

Gefährdete Sandvegetation der nördlichen Oberrheinebene: vegetationsökologische Untersuchungen der Technischen Universität Darmstadt 1995-2013 im Landkreis Darmstadt-Dieburg und im Bereich der Stadt Darmstadt

Angelika Schwabe, Carsten Eichberg, Michael Stroh & Christian Storm

Abstract

Threatened sand vegetation of the northern Upper Rhine Valley: vegetation ecological studies of the “Technische Universität Darmstadt“ 1995-2013 in the administrative district of Darmstadt-Dieburg and the city district of Darmstadt

In the last nearly twenty years we ran a series of studies on the threatened sand vegetation of the northern Upper Rhine Valley with the aim to work out empirical data and rules for the protection and restoration of these vanishing, highly fragmented ecosystem types. This paper summarizes results of these studies.

Various Fauna-Flora-Habitat types as well as threatened plant and animal species occur in the study area. The characteristic vegetation types in the course of early to mid-succession are: *Sileno conicae-Cerastietum semidecandri*, *Koelerion glaucae* and *Allio sphaerocephali-Stipetum capillatae*. More consolidated sites are characterized by stands of the *Armerio-Festucetum trachyphyllae* with slightly acidic conditions in the top-soil layer. Sheep grazing was established in the years 1999/2000; some years later, additionally donkey grazing was implemented.

We studied abiotic soil conditions, floristic composition and structure, phytodiversity (also in relation to productivity), soil seed bank, seed dispersal, seed rain and spontaneous succession. We developed a successional model with two main pathways: if soil nutrient contents are relatively low (especially phosphate) there is a typical and relatively slow pathway from pioneer vegetation / *Koelerion glaucae* to *Allio-Stipetum*; if the values are higher there is a quick pathway of ruderalization. Our hypothesis was that by grazing it should be possible to develop a mosaic structure of different successional stages, and especially to divert the ruderal pathway into the typical pathway.

Permanent-plot studies for mostly more than 10 years have shown that, if an appropriate management is carried out, grazing is beneficial for the nature-conservation value of the sites. For instance, we detected higher proportions of target species in the grazed plots and higher cover percentages of competitive grasses, such as *Calamagrostis epigejos*, in the ungrazed plots. Especially successive grazing by sheep and donkeys will reduce competitors.

Remarkable are the effects of sheep within the generative regeneration cycle of plant species of open sand vegetation. There is the creation of gaps by trampling which favours low-competitive plant species, involving an activation of the soil seed bank. Furthermore, sheep act as seed-dispersal vectors for many species by means of their fur (epizoochory) and their digestive system (endozoochory). The numbers of dispersed seeds per day are enormous. Field experiments have shown, that some Red-List species are able to survive mastication and digestive passage, then to set seedlings, establish and set seeds. There is an environmental sieve in the harsh environment which causes that competitive graminoid species have little chances of establishment after endozoochoric dispersal. We were able to show, that sheep act as “gardeners” by trampling on seeds and incorporating them into the soil; buried seeds are protected from above-ground predation and have higher seedling-emergence success (this was shown for the highly threatened species *Jurinea cyanoides*). Additionally, sheep favour the seedling-emergence and fruiting success of dung-embedded seeds by trampling on sheep or rabbit dung and creating a seed bed.

Restoration practices are successful especially when using a combination of abiotic (use of nutrient-poor sand as an upper soil layer) and biotic approaches (inoculation with plant material of target areas). It is possible to restore

Koelerion glaucae stands by means of these combined measures. "Restorative grazing" (higher grazing pressure) is an alternative - albeit less effective - tool in ruderalized areas, if abiotic restoration is not feasible.

In the frame of the Testing and Development (T+D) project "Ried und Sand" it was possible to establish a grazing network between remnants of sandy areas with good conservation status (main network function: sources of habitat-typical seeds), sandy areas with ruderalized character (animal nutrition, mainly in terms of quantity) and nutrient-richer "Ried" stands (animal nutrition, in terms of quantity and quality).

We have shown by different approaches that sheep grazing is a very suitable management practice to maintain and enhance the nature-conservation value of threatened open sand ecosystems. If an optimized grazing management of target areas is combined with restoration efforts (enlargement of the threatened habitats or creation of new "stepping stone habitats"), an efficient functional network will be established. This concept of modern nature conservation is suitable also for some other ecosystem types. For special purposes (e.g. reduction of graminoid competitors, grazing of small areas) donkey grazing is a very effective and suitable management practice.

Keywords: *Allio sphaerocephali-Stipetum capillatae*, *Armerio-Festucetum trachyphyllae*, diaspores, disturbance, epizoochory, endozoochory, Fauna-Flora-Habitat, grazing, habitat fragmentation, *Jurineo cyanoidis-Koelerietum glaucae*, productivity, restoration, *Sileno conicae-Cerastietum semidecandri*, soil nutrients, succession

Gliederung

1. Einführung und Ziel dieser Zusammenstellung

2. Untersuchungsgebiet

3. Naturschutzfachliche Aspekte, Flora und Vegetation

4. Beweidungsmanagement der Flächen

5. Struktur der Sandvegetation

5.1. Floristische Struktur der Pflanzengesellschaften, Raumstruktur und Blühphänologie

5.2. Phytodiversität und Produktivität

5.3. Bedrohung der offenen Sandvegetation durch invasive Arten?

5.4. Diasporenbank („seed bank in the soil“) und Diasporen-Niederschlag („seed rain“)

6. Untersuchungen zum Verhältnis oberirdische zu unterirdische Phytomasse und zum Nährstoffhaushalt

7. Entwicklung der Sandvegetation in der Zeitachse: spontane Sukzession ohne Beweidung

7.1. Frühe Pionierstadien

7.2. *Koelerion glaucae*-Komplex

7.3. *Allio sphaerocephali-Stipetum capillatae*

7.4. Ruderalisierende Flächen

7.5. Sukzessionsmodell: Pionier- bis mittlere Stadien

7.6. Wälder

8. „Störung“ („disturbance“) – ein Faktorenkomplex zur Erhaltung offener Sandvegetation

8.1. Resilienz gegenüber abiotischen und biotischen Störungen?

8.2. Beweidung als dynamisierender Faktorenkomplex

8.2.1. Monitoring beweideter und unbeweideter Flächen

8.2.2. Fraßpräferenzen

8.2.3. Entstehung von Offenboden-Stellen durch Weidetiere

9. Schafe als Vektoren zwischen den Flächen: Diasporen-Ausbreitung und Nach-Ausbreitungsschicksal von Diasporen

9.1. Diasporen-Dichte und -Diversität in Faeces und Fell

9.2. Verweilzeit von Diasporen im Fell

9.3. Nach-Ausbreitungsschicksal und Etablierungserfolg der von Schafen transportierten Diasporen

10. Das Instrument der Restitution („ecological restoration“)

10.1. Allgemeines

10.2. Abiotische Maßnahmen

10.3. Biotische Maßnahmen

10.4. Entwicklung der restituierten Flächen in der Zeitachse

11. „Ried und Sand“: Zusammenführung von Naturschutz, Beweidung und Tierernährung

12. Gesichtspunkte für den Naturschutz

1. Einführung und Ziel dieser Zusammenstellung

Seit fast 20 Jahren führt die Arbeitsgruppe Vegetations- und Restitutionsökologie der Technischen Universität Darmstadt (Fachbereich Biologie) Untersuchungen in der gefährdeten Sandvegetation der nördlichen Oberrheinebene durch. Lag der Schwerpunkt in den ersten Jahren in der Evaluation der noch vorhandenen Gebiete und der Beschreibung ihrer floristischen Struktur, begannen ab 1999 Untersuchungen zum Einfluss von Schafbeweidung auf die Vegetation. Ab 2004 konnte auch Eselbeweidung untersucht werden. Parallel zu den Beweidungsuntersuchungen begannen Arbeiten zur Restitution von Sandökosystemen.

Die Untersuchungen konnten dank der administrativen und finanziellen Unterstützung durch den Landkreis Darmstadt-Dieburg (Kooperationsvertrag seit 1995) durchgeführt werden. Auch das Regierungspräsidium Darmstadt gewährte uns im Rahmen eines Kooperationsvertrages administrative Unterstützung. Die Etablierung der Beweidungssysteme mit Schafen und Eseln und die Realisierung zahlreicher Freilandexperimente war nur möglich durch die unermüdliche, kompetente Arbeit des Landschaftspflegehofes Stürz (Ober-Ramstadt), der insbesondere auch Naturschutzaspekte bei der Beweidung in hohem Maße umgesetzt hat (Abb. 1).



Abb. 1: Herde des Landschaftspflegehofs Stürz im NSG „Griesheimer Düne und Eichwäldchen“ (Frühsommeraspekt). Foto: A. Schwabe.

Sehr intensive Untersuchungen fanden vor allem im Rahmen von zwei großen Drittmittelprojekten statt: zunächst in den Jahren 2000 bis 2004 im BMBF-Projekt „SÖB“: „Sand-Ökosysteme

im Binnenland: Dynamik und Restitution“, dann von 2004 bis 2011 im Rahmen des E+E-Vorhabens „Ried und Sand - Biotopverbund und Restitution durch extensive Landbewirtschaftung“ (finanziert durch das Bundesamt für Naturschutz mit Mitteln des BMU). Letzteres Projekt wurde mit dem Landkreis Darmstadt-Dieburg, der das Hauptverfahren leitete, durchgeführt. Das Projekt „SÖB“ war ein Verbundprojekt mit der Universität Osnabrück (Abteilung Ökologie, Fachbereich Biologie und Chemie) und bezog auch vergleichend Sand-Ökosysteme im Emsland ein. Insgesamt 10 Doktorarbeiten konnten im Rahmen dieser Projekte an der Technischen Universität Darmstadt abgeschlossen werden (ZEHM 2003, BERGMANN 2004, SÜSS 2005, EICHBERG 2005, STROH 2006, WESSELS 2007, BEIL 2007, LANGHANS 2008, FAUST 2011, FRITSCH 2012), eine weitere an der Universität Osnabrück (KRAUSCH 2012).

Im Rahmen der beiden großen Projekte gibt es zwar jeweils publizierte Abschlussberichte (SCHWABE & KRATOCHWIL 2004, SÜSS et al. 2011a), dazu eine Fülle von zumeist englischsprachigen Publikationen in internationalen Zeitschriften, jedoch fehlte bisher eine kürzere Zusammenstellung in deutscher Sprache. Diese möchten wir hiermit vorlegen und wünschen uns, dass sie auch für Praktiker im Naturschutz hilfreich ist.

„Störung“ („disturbance“) ist ein zentraler Begriff für das Management gefährdeter Sandvegetation; dies wird ein roter Faden für die hier vorliegende Arbeit sein.

Mit Störungen und ihren Auswirkungen auf die Vegetation hat sich auch in besonderem Maße unser Kollege von der Technischen Universität Braunschweig, Prof. Dr. Dietmar Brandes, beschäftigt, indem er die synanthrope Vegetation, vor allem die Ruderalvegetation, zum wichtigen Thema der Forschung seiner Arbeitsgruppe machte. Wir widmen ihm diese Arbeit zum 65. Geburtstag, verbunden mit vielen guten Wünschen für die Zukunft.

2. Untersuchungsgebiet

Die Untersuchungsflächen liegen im Landkreis Darmstadt-Dieburg und im Bereich der Stadt Darmstadt und markieren die Übergangszone zwischen dem Hessischen Ried (früherer Neckar-Lauf) und dem Odenwald. Die größtenteils basenreichen Sande wurden spät- und postglazial aus den Rheinterrassen ausgeweht und immer wieder umgelagert (AMBOS & KANDLER 1987). Solche dynamischen Prozesse erfolgten in der Naturlandschaft, aber auch später durch den Menschen und seine Weidetiere. Auch die bis in das Mittelalter zurückgehende militärische Nutzung bewirkte offene Standorte. Heute sind die Offenland-Standorte mit typischer basenreicher Sandvegetation stark dezimiert und fragmentiert: Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung, Aufforstung, Überbauung, Eutrophierung und allgemein Sukzessionsprozesse spielen eine zentrale Rolle für die Dezimierung. Das großflächige Sandgebiet im „Griesheimer Sand“ (Luftbild bei ZEHM & ZIMMERMANN 2004), das bis ca. 1945 noch existierte, weist heute noch drei hochkarätige Restflächen auf: das NSG „Ehemaliger Euler-Flugplatz von Darmstadt“ (71 ha), das NSG „Griesheimer Düne und Eichwäldchen“ (46 ha) und die „Beckertanne“ und Randgebiete (43 ha); s. dazu Abb. 2 und 3.

Alle genannten Flächen sind auch Fauna-Flora-Habitat-(FFH-)Gebiete und Gebiete der Vogelschutzrichtlinie. Für letztere sind die Vogelarten Steinschmätzer, Wiedehopf, Schwarzkehlchen u. a. von besonderer Wichtigkeit. Bezeichnend ist für alle Gebiete die biogeographische Grenzlage zwischen Ost und West und Nord und Süd, so dass sich (sub)kontinentale, subatlantische und submediterrane Floren- und Faunenelemente verzahnen. Wir konnten in den Gebieten Euler-Flugplatz und Griesheimer Düne bezogen auf die ausgeschiedenen Vegetationstypen und vor der Einführung von Beweidung beweidete und unbeweidete Probestellen anlegen; diese wurden zufällig ausgewählt (stratifiziert-randomisiertes Versuchsdesign); s. dazu Abb. 9 bei ZEHM & ZIMMERMANN (2004).

Klimatisch zeichnet sich das Gebiet durch relativ hohe Jahresschwankungen der Temperatur aus (bis 19 °C); die mittlere Jahrestemperatur liegt bei 9,7 °C, die mittleren Jahres-Niederschlagswerte bei 658 mm (1961-1990 Frankfurt/Main Flughafen, www.dwd.de). Die Meereshöhen der Untersuchungsflächen liegen zwischen 100 m bis 150 m.



Abb. 2: Schafbeweidung im NSG „Ehemaliger Euler-Flugplatz von Darmstadt“, Blick vom *Koelerion glaucae* im Osten nach Westen. Im Vordergrund: *Helichrysum arenarium*, blühend. (Nach SCHWABE et al. 2010).

3. Naturschutzfachliche Aspekte, Flora und Vegetation

Viele Pflanzen- und Tierarten sowie Habitat-/Vegetationstypen der Sandökosysteme sind stark gefährdet. Zu den nach der FFH-Richtlinie gefährdeten Habitaten gehören in unseren Sandgebieten (s. auch SSYMANK et al. 1998):

1. Typ 2330 Dünen mit offenen Grasflächen mit *Corynephorus* und *Agrostis* (Dünen im Binnenland)
2. Typ 6120 Trockene, kalkreiche Sandrasen (*Koelerion glaucae*)
3. Typ 6214 Halbtrockenrasen sandig-lehmiger basenreicher Böden (*Koelerio-Phleion phleoidis*)
4. Typ 6240 Subpannonische Steppen-Trockenrasen (*Festucetalia vallesiaca*).



Abb. 3: *Allio sphaerocephali-Stipetum capillatae*-Vegetationskomplex im Gebiet Griesheimer Düne mit blühenden Fazies von *Euphorbia cyparissias* und vorjährigen *Stipa*-Halmen im Mai-Aspekt. (Nach SCHWABE et al. 2013).



Abb. 4a: *Jurinea cyanoides*, stark gefährdete Art des Anhanges II der FFH-Richtlinie mit *Bombus sylvarum*. Foto: A. Schwabe.



Abb. 4b: *Bassia laniflora* (hier fruchtend) ist extrem selten, konnte aber auch auf Restitutionsflächen etabliert werden. Die Art benötigt stetig schwach gestörte Kleinstandorte und ist sehr konkurrenzschwach. Foto: A. Kratochwil.



Abb. 4 c: *Fumana procumbens* ist sehr selten, bildet jedoch große Bestände im Gebiet des Tiefsand-Korridors in Seeheim-Jugenheim. Foto: A. Schwabe.

Die Sandstandorte bergen seltene, konkurrenzschwache Pflanzenarten (Abb. 4 a-c). Für die besonders gefährdeten Arten der Sandvegetation wurden Artenhilfsprogramme durch die „Botanische Vereinigung für Naturschutz in Hessen“ zusammengestellt (*Alyssum montanum* subsp. *gmelinii*: HODVINA & CEZANNE (2007a), *Bassia laniflora*: HODVINA & CEZANNE (2008a), *Chimaphila umbellata*: HODVINA et al. (2009), *Fumana procumbens*: HODVINA & CEZANNE (2007b), *Mibora minima*: HODVINA & BUTTLER (2002), *Nigella arvensis*: HODVINA & CEZANNE (2007c), *Poa badensis*: HODVINA & CEZANNE (2008b); hinzu kommen Artenschutz-Informationen von „Hessen Forst FENA“ (z. B. zu der Art des FFH-Anhanges II *Jurinea cyanooides*, BEIL & ZEHEM 2006, BEIL 2011). In diese Bestandsaufnahmen sind auch viele Ergebnisse der in unseren Projekten durch gezieltes Management initiierten Populationsvergrößerungen der genannten Arten eingegangen. Weitere Rote Liste-Pflanzenarten, wie z. B. *Corynephorus canescens*, *Koeleria glauca*, *Linum perenne*, *Medicago minima*, *Phleum arenarium*, *Silene conica*, *S. otites*, *Stipa capillata*, *Veronica praecox* und *V. verna*, treten auf (RL Hessen, HMULV 2008). Für *Stipa capillata* konnte in einer genetischen Studie für Zentraleuropa gezeigt werden, dass hier eine sehr geringe genetische Variabilität vorliegt (HENSEN et al. 2010); hierbei gingen auch Daten aus unserem Gebiet ein.

Auf gefährdete xerobionte Tierarten sei nur hingewiesen; im Rahmen unserer Projekte konnten Laufkäfer (LEHMANN et al. 2004, PERSIGHEIL et al. 2004, FRITZ & LUDEWIG in SÜSS & SCHWABE 2011), Heuschrecken (ZEHEM 1997, 2003, ZEHEM in SCHWABE et al. 2004a, RAUSCH in SÜSS & SCHWABE 2011) und insbesondere Wildbienen bearbeitet werden (BEIL & KRATOCHWIL 2004, BEIL 2007, BEIL et al. 2008, 2014, KRATOCHWIL et al. 2009, KRAUSCH 2011, 2012).

Pionierfluren auf basenreichen Sanden sind gekennzeichnet durch *Koelerio-Corynephoretea*-Gesellschaften: *Sileno conicae-Cerastietum semidecandri* Korneck 1974 und lückige Rasen des *Koelerion glaucae* mit dem *Jurineo-Koelerietum glaucae* Volk 1931 (beides zu den *Koelerio-Corynephoretea* gehörend); s. Abb. 5. Konsolidiertere Rasen werden durch das *Allio sphaerocephali-Stipetum capillatae* Korneck 1974 (*Festuco-Brometea*) geprägt (Abb. 6). Auf oberflächennah entkalkten Flächen, z. B. am Euler-Flugplatz, tritt das *Armerio-Festucetum trachyphyllae* Knapp 1948 ex Hohenester 1960 auf (*Koelerio-Corynephoretea*).

Die Unterscheidung zwischen dem *Bromo tectorum-Phleetum arenarii* Korneck 1974, das besonders kalkreiche, bewegte Sande besiedeln soll, und dem *Sileno conicae-Cerastietum semidecandri* Korneck 1974, das nach KORNECK (1974) kalkärmere Standorte besiedelt, treffen wir hier nicht. Die Unterschiede zwischen diesen beiden Assoziationen sind gering und werden stark auf *Phleum arenarium* bezogen, das jahresweise fluktuiert. Wir verwenden, wie BERG et al. (2001, 2004) in Mecklenburg-Vorpommern, ein weit gefasstes *Sileno-Cerastietum*.

Als Beispiel für die typische Vegetation im Gebiet des Griesheimer Sandes sei das NSG „Ehemaliger Euler-Flugplatz von Darmstadt“ angeführt. Das Gebiet wurde 1996 größtenteils (71 ha) als NSG ausgewiesen und hat sich erhalten, weil es nach dem 2. Weltkrieg bis 1992 durch die amerikanischen Streitkräfte genutzt wurde und dann nach Abwägung divergierender Interessen (Bebauung, Geschäftsflughafen u. a.) schließlich als NSG ausgewiesen werden konnte. Der älteste Flugplatz Deutschlands, der seit 1913 genutzt wird (ZEHEM & ZIMMERMANN 2004), gehört inzwischen der Technischen Universität Darmstadt, die eine naturverträgliche Nutzung zusichert. Die Vegetation ist durch einen ausgeprägten Gradienten von Ost nach West gekennzeichnet (Abb. 7): zunächst *Koelerion glaucae* im Osten, dann verschiedene Typen des *Armerio-Festucetum trachyphyllae*, schließlich im Westen stärker ruderalisierte Stadien auf früheren Äckern (PAETZ 1999).



Abb. 5: *Jurineo cyanoidis-Koelerietum glaucae* mit blühender *Jurinea* und einem Horst von *Koeleria glauca* im Hintergrund.
Foto: A. Schwabe.



Abb. 6: *Allium sphaerocephalon*- und *Galium verum*-Aspekt des *Allio-Stipetum* am Rand des *Pyrolo-Pinetum* bei Bickenbach/Bergstraße. Foto: A. Schwabe.

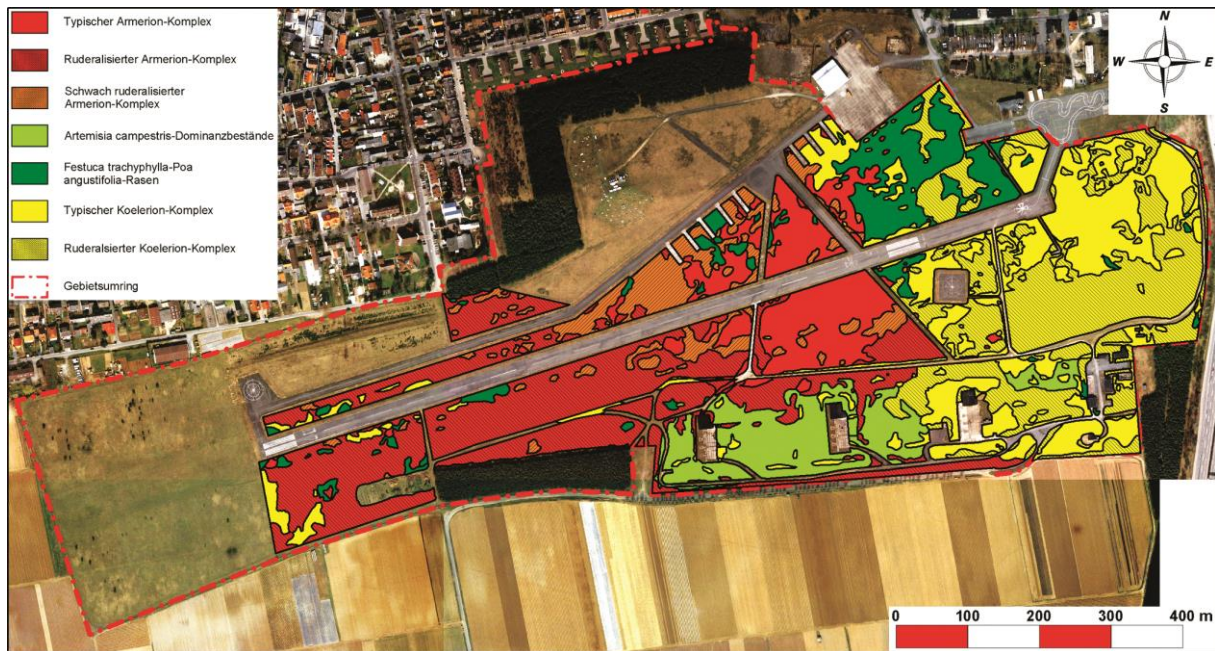


Abb. 7: Vereinfachte Vegetationskarte des Euler-Flugplatzes nach einer Vegetationskarte von PAETZ (1999). Quelle Luftbild: Stadtvermessungsamt Darmstadt 2000. (Nach ZEHEM & ZIMMERMANN 2004).

4. Beweidungsmanagement der Flächen

Fast alle Habitat-/Vegetationstypen der Sandvegetation sind abhängig von hoher Dynamik und immer wiederkehrender Störung der progressiven Sukzession. Eine solche Dynamik sollte durch ein angepasstes Beweidungsregime erhalten und entwickelt werden (s. dazu die Literaturstudie von ROSENTHAL et al. 2012 für das temperate Europa).

In den Jahren 1999/2000 wurde im Untersuchungsgebiet ein Beweidungsmanagement etabliert, das bis heute fortbesteht und immer weiter entwickelt wird. Eine zentrale Rolle spielt hier eine Wanderschafherde mit 600-800 Tieren (ca. 500 Mutterschafe), die vor allem aus Skudden, Moorschnucken und Dorperschafen besteht, also wenig anspruchsvollen Rassen. Diese Herde zieht von Fläche zu Fläche (Abb. 8) in einem Gebiet, das ca. 15 km Luftlinie (von N nach S) umspannt, zwischen Seeheim-Jugenheim und Bickenbach im Süden und Griesheim im Norden, und ca. 7 km in der Breite (s. die Weideroute und das schematisierte Weideregime bei STROH & SÜSS 2011). Die Besatzdichten in den Sandgebieten liegen in den gut entwickelten Sandgebieten bei ca. 0,2 bis 0,4 Großvieheinheiten pro Hektar und Jahr, in den stärker ruderalisierten Bereichen bei bis zu 1 oder punktuell auch mehr (s. dazu auch ZEHM & ZIMMERMANN 2004). Die Beweidung findet als Stoßbeweidung auf Koppeln mit mobilen Zäunen statt, die ein- bis zweimal im Jahr für Stunden bis wenige Tage beweidet werden (Abb. 8). Insgesamt werden ca. 300 ha durch Schafe beweidet.



Abb. 8: Koppelwechsel der ziehenden Schafherde auf einer Restitutionsfläche in Seeheim-Jugenheim mit Mutterschafen und Lämmern im Juni. Foto: A. Schwabe.

Nicht nur Sandflächen werden beweidet, sondern auch – zur Verbesserung der Tierernährung – seit dem Jahre 2004 Riedflächen. Die Machbarkeit einer funktionellen Verknüpfung zweier unterschiedlich produktiver Habitattypen miteinander (Tierernährung) und jeweils untereinander (Diasporenaustausch) war die Hauptfragestellung im Vorhaben „Ried und Sand“ (SÜSS et al. 2011a, http://www.bfn.de/0304_ried_u_sand-pdm.html, www.riedundsand.de, s. Kap. 11.).

Die Weidetiere sollten neben den direkten Fraßeffekten und Bodenstörungen auf den Flächen auch ermöglichen, dass stark fragmentierte Flächen der Sandvegetation durch die Vektorfunktionen der Weidetiere vernetzt werden. Die Tiere ziehen von Sandfläche zu Sandfläche und breiten Samen und Früchte (Diasporen) im Fell (epizoochor, s. Abb. 9) und im Magen-Darm-Trakt (endozoochor) aus. Durch ein gezieltes Management sollen auf diese Weise auch die Genpools der Pflanzenpopulationen vergrößert werden (SÜSS et al. 2011a).

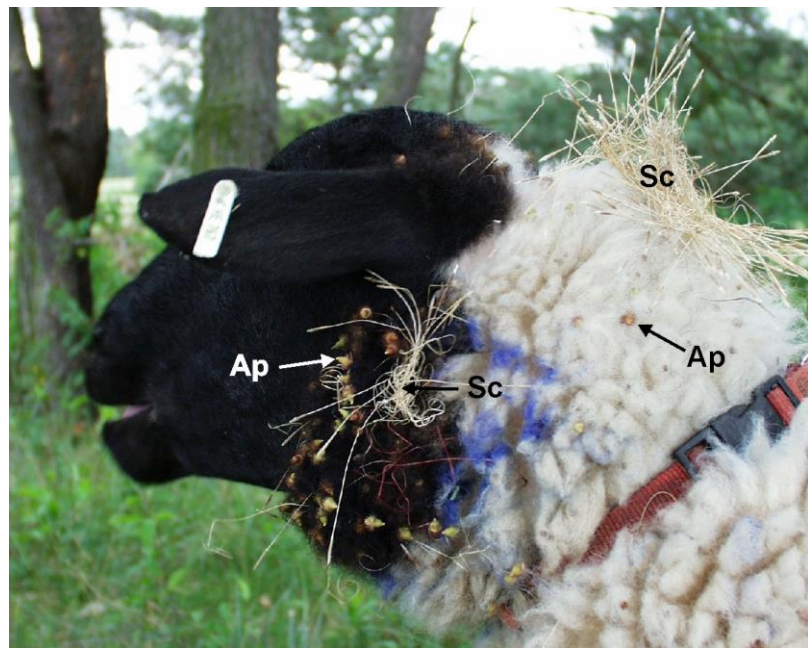


Abb. 9: Rhönschaf mit anhaftenden Diasporen von *Agrimonia procera* (seitlich) und *Stipa capillata* (oben hinter dem Kopf und seitlich). (Nach EICHBERG & WESSELS-DE WIT 2011).

In kleinerem räumlichen Umfang wird im Untersuchungsgebiet Eselbeweidung durchgeführt (114 ha). Die Beweidung mit Eseln wird z. T. als Zusatzbeweidung zu den Schafen angewendet (Multispezies-Beweidung; z. B. Griesheimer Düne) und z. T. als einzige Beweidungsform (Singlespezies-Beweidung). Sukzessive Schaf-Esel-Beweidung zeigt besonders günstige Effekte bei ruderalisierten Flächen (SÜSS & SCHWABE 2007). Auf isoliert liegenden Flächen oder solchen, die sehr klein sind, wird ausschließlich Eselbeweidung eingesetzt (z. B. ND Rotbühl, 4 ha, Weiterstadt).

5. Struktur der Sandvegetation

5.1. Floristische Struktur der Pflanzengesellschaften, Raumstruktur und Blühphänologie

Tab. 1 zeigt die floristische Struktur kennzeichnender und differenzierender Artengruppen in Aufnahmen in der Skalengröße 25 m² aus dem Jahre 2000 auf dem Euler-Flugplatz und auf der Griesheimer Düne. Die drei Haupttypen *Koelerion glaucae* (Abb. 10), *Allio-Stipetum* (Abb. 3) und *Armerio-Festucetum* (Abb. 11) sind klar floristisch getrennt. Es gibt jeweils typische und ruderalisierte Ausbildungen, die auch für das Vegetationsmosaik auf dem Euler-Flugplatz in Abb. 7

dargestellt sind. Die typische Ausbildung des *Armerio-Festucetum* enthält noch einige Lückenzeiger, wohingegen diese den stärker ruderalisierten Ausbildungen weitgehend fehlen. Vollständige pflanzensoziologische Aufnahmen der Gebiete haben wir u. a. in KROLUPPER & SCHWABE (1998), STORM et al. (1998), SCHWABE et al. (2004a), SÜSS et al. (2010) und SCHWABE et al. (2013) publiziert; diese Aufnahmen enthalten auch Seltenheiten wie z. B. *Jurinea cyanoides* oder *Poa badensis*.

Hinzu kommen noch „Biologische Krusten“, bestehend aus Cyanobakterien, Grünalgen, Moosen und Flechten (BELNAP & LANGE 2001), die ihren Schwerpunkt im *Koelerion glaucae*-Vegetationskomplex haben (d. h. einem Mosaik von Kryptogamen-Stadien und Beständen des *Sileno-Cerastietum* und *Koelerion glaucae*). *Nostoc*, *Microcoleus*, *Oscillatoria*, *Zygogonium* und Protonemata traten in den Aufnahmen von HACH et al. (2005) dominant auf. Initiale Krusten sind u. a. durch *Klebsormidium flaccidum* und *Stichococcus bacillaris* gekennzeichnet, stabile Krusten (> 20 Jahre alt) durch *Tortella inclinata* (LANGHANS et al. 2009a).

Untersuchungen zur vertikalen Vegetationsstruktur wurden vor allem von ZEHM (1997) mit Hilfe digitaler Bildauswertungen durchgeführt, s. auch ZEHM et al. (2003), ZEHM in SCHWABE et al. (2004b), ZEHM (2004a). Diese Strukturdaten sind mit Aufnahmen zur Verteilung von Heuschrecken-Gemeinschaften verknüpft worden (ZEHM 1997, 2003). Der Gradient von der Pioniervegetation zum *Allio-Stipetum* und zu ruderalen Stadien mit *Calamagrostis* weist bedingt durch die verschiedenartige Vegetationsstruktur starke mikroklimatische Unterschiede auf, wobei thermobionte Arten in den ruderalen Stadien mehr und mehr ausfallen (ZEHM 1997).



Abb. 10: Initiales *Koelerion glaucae* am Euler-Flugplatz mit blühender *Koeleria glauca* und weiteren Pionierarten wie *Erodium cicutarium* (hinten links und Mitte) und einem dichten *Tortula ruraliformis*-Bestand. Foto: A. Schwabe.

Tabelle 1: Stetigkeitstabelle charakterisierender und differenzierender Arten in den Gebieten Euler-Flugplatz und Griesheimer Düne im Griesheimer Sand. K = *Koelerion glaucae*, S = *Allio-Stipetum capillatae*, A = *Armerio-Festucetum trachyphyllae*, rud = ruderalisiert. Jeweils 4 Aufnahmen (Jahr 2000), angegeben sind neben der Stetigkeit die Amplituden der Artmächtigkeiten. (M) = Moose, (L) = Flechten. Nach SCHWABE et al. 2004a, gekürzt.

Gesellschaft	K		K	rud	S		S	rud	A		A	rud	A	rud				
Zahl der Aufnahmen	4		4		4		4		4		4		4					
Ch, D <i>Koelerion glaucae</i>																		
<i>Koeleria glauca</i>	3	2m	2	2m	1	2m												
<i>Phleum arenarium</i>	4	1 2m	3	1 2m														
<i>Veronica praecox</i>	2	+	1	3	2m													
<i>Cetraria aculeata</i> (F)	2	2m	2	2m														
<i>Psyllium arenarium</i>	4	1 2m	1	+					1	+								
Ch, D <i>Koelerion glaucae</i> sowie S, A (lückig)																		
<i>Echium vulgare</i>	2	+	2m	3	+	2a	3	r 1	1	1	2	+	2m	1	+			
<i>Tortula ruraliformis</i> (M)	4	4	5	1	2m		2	2a 3			1	2m	2	2m				
<i>Saxifraga tridactylites</i>	4	2m	2a	3	2m		4	2m	1	2m			1	1				
<i>Helichrysum arenarium</i>	2	1		3	1	2a	4	1 2m	3	r 2m	4	1	2m					
<i>Cladonia rangiformis</i> (F)	2	2b		4	2a	2b	4	2m 2b			2	2m						
<i>Corynephorus canescens</i>	4	2a	2b	2	1	2m	4	1 2m			2	2m						
<i>Poa bulbosa</i>	4	2a	3	3	2m	2b	1	2m			1	2a						
<i>Peltigera rufescens</i> (F)	3	2m		4	2m		2	2m 2a	1	2m								
<i>Erophila verna</i>	3	1		2	1		3	+	2m	2	2m							
<i>Vulpia myuros</i>	3	2m	2a	2	2m	2a					2	2m						
<i>Veronica verna</i>	2	2m		4	1	2m					1	2m						
Ch, D <i>Allio-Stipetum capillatae</i> (S)																		
<i>Stipa capillata</i>							4	2b 3	4	2a 3								
<i>Phleum phleoides</i>							2	2m 2a	2	2m 2a								
<i>Helianthemum nummularium</i> subsp. <i>obscurum</i>							3	1 2m										
<i>Alyssum alyssoides</i>							4	1 2m										
<i>Asperula cynanchica</i>							2	2m										
Ch, D <i>Armerio-Festucetum trachyphyllae</i> (A)																		
<i>Koeleria macrantha</i>	2	2m		3	1	2a	1	1	2	2a	4	2a 3	1	2a 2b	3	1 2m		
<i>Medicago falcata</i> (incl. <i>M. x varia</i>)				1	1		2	1	4	+	1	3	r 2m	1	2a 3	4	2a 3	
<i>Trifolium campestre</i>				3	1	2a	1	1				4	2m 2a	2	1 2b	4	2m 3	
<i>Potentilla argentea</i> agg.							2	1	3	+	2m	4	1 2b	4	2m	4	1 2m	
<i>Armeria maritima</i> subsp. <i>elongata</i>				1	2m							4	2m 2a	4	1 2m	4	2m 2a	
<i>Achillea millefolium</i> agg.									1	2m		4	1 2m	3	2m	1	1	
<i>Brachythecium albicans</i> (M)							1	2a						4	2a 2b	4	2m 2b	
<i>Cerastium arvense</i>												4	2m 2b	4	2m 2a	4	1 2a	
<i>Plantago lanceolata</i>												2	1-	3	+	2a	4	1 2a
<i>Agrostis capillaris</i>												4	2b 3	2	1 2a	1	2m	
<i>Agrostis vinealis</i>												2	2m 2a					
Ruderalisierungszeiger																		
<i>Carex hirta</i>	1	2m		4	2a 3		2	1 2m	4	2m 2b	1	2a		3	2m 3	3	1 2m	
<i>Poa angustifolia</i>	2	2m		4	2a 2b		3	2m 2b	4	2b 3	4	2m 2b		4	2a 3	4	3 4	
<i>Elymus repens</i>	2	2m		2	1 2a				2	1 2m	2	2m		2	1 2m	3	2m	
<i>Saponaria officinalis</i>							1	+	2	2b	1	+		4	1 2a	3	r 1	
<i>Bromus hordeaceus</i>							1	1			3	+	2m	4	+	2m	4	1 2m
<i>Cynodon dactylon</i>				2	3									2	2a 2b	4	2a 3	
<i>Tragopogon dubius</i>							2	3	+					4	+	1	4	1 2m
<i>Silene latifolia</i> subsp. <i>alba</i>				1	+									4	r	+	3	+
<i>Calamagrostis epigejos</i>							4	1 2m	4	2a 2b								
<i>Vicia hirsuta</i>																	2	1 2m



Abb. 11: Sommeraspekt des *Armerio-Festucetum trachyphyllae typicum* auf dem Euler-Flugplatz mit blühenden Exemplaren von *Armeria maritima* subsp. *elongata*, *Verbascum phlomoides* und dem Lückenzeiger *Echium vulgare*. Foto: A. Schwabe.

Die Blühphänologie der untersuchten Gesellschaften weist ausgeprägte jahreszeitliche Blumenwellen auf. Diese wurden von BEIL (2007), BEIL & KRATOCHWIL (2004) und FAUST et al. (2007) dokumentiert. Besondere Bedeutung als Blütenressource für Wildbienen haben die Blütenhorizonte von *Centaurea stoebe* s. l., eine Sippe mit stark ruderaler Tendenz (Abb. 12). In Kaninchenreichen Jahren kommt es zum starken Zusammenbruch der Blütenhorizonte, wie FAUST et al.

(2007) durch den Vergleich von Kaninchen-beweideten mit Kaninchen-freien (Exclosures) Flächen im *Armerio-Festucetum trachyphyllae* zeigen konnten. Der Blühhorizont u. a. von *Armeria maritima* subsp. *elongata* erlischt; nur wenige Arten, wie z. B. *Euphorbia cyparissias* und *Geranium molle*, werden von den Kaninchen gemieden.



Abb. 12: *Centaurea stoebe* s.l.-Aspekt im Bereich ehemaliger Äcker auf der Griesheimer Düne im Spätsommeraspekt. Diese Sippe mit leicht ruderaler Tendenz hat besondere Bedeutung als Pollenressource für blütenbesuchende Wildbienen. Foto: A. Schwabe.

5.2. Phytodiversität und Produktivität

Untersuchungen im Gebiet Euler-Flugplatz auf einer sehr feinkörnigen Skala mit Probeflächen von 2 m² zeigten die höchsten Werte der Diversität von Höheren Pflanzen und speziell von Rote Liste-Pflanzenarten (HMULV 2008) im *Koelerion glaucae*-Vegetationskomplex. Hier gab es jedoch die geringsten Produktivitätswerte, die gemessen wurden als oberirdische Phytomasse oberhalb Stoppelhöhe. In großen Probeflächen (79 m²) wurde die Produktivität mit Hilfe von Color-infrarot-Luftbildern ermittelt. Hier zeigte sich, dass die höchste Diversität in mittleren Stadien (*Armerio-Festucetum trachyphyllae*) anzutreffen war (SÜSS 2005, SÜSS et al. 2007). In Jahren mit extremer Witterung können diese Beziehungen jedoch variieren.

Der Befund für manche Systeme, dass bei mittlerer Produktivität die Diversität generell am höchsten ist (GRIME 1973, AL MUFTI et al. 1977), ist auf unser System für die feinkörnige Skala nicht anwendbar.

Hinzu kommt noch die hohe Diversität „Biologischer Krusten“. Untersuchungen von HACH et al. (2005) und LANGHANS (2008) zeigten, dass diese Krusten eine erstaunliche Diversität an verschiedenen Taxa haben. Bei 18 Krusten-Kleinflächen von 5 cm x 5 cm fanden HACH et al. (2005) mit direkter Determination eine mittlere Zahl von 19,2 Taxa/Kleinfläche. Bei Verwendung von Anreicherungstechniken im Labor können noch mehr Taxa nachgewiesen werden (LANGHANS et al. 2009a).

Es zeigt sich, dass der *Koelerion glaucae*-Vegetationskomplex ein ausgesprochener Hotspot der Diversität ist.

5.3. Bedrohung der offenen Sandvegetation durch invasive Arten?

Es ist bisher gelungen, *Senecio inaequidens*, das für die Weidetiere durch seine Giftigkeit (Pyrrolizidinalkaloide) ein Problem darstellt, manuell-mechanisch zu bekämpfen. Auch *Ambrosia artemisiifolia*, die hohes allergenes Potenzial besitzt, wurde durch manuell-mechanische Maßnahmen z. B. im ND Rotbühl zurückgedrängt. Die Art siedelt sich immer wieder mit Vogelfutter als Hauptvektor an (BRANDES & NITZSCHE 2007); z. T. kann sie sekundär durch Bodentransporte verschleppt werden (auch bei Restitutionsvorhaben).

Schon zu Beginn der Untersuchungen stellten große Bestände von *Cynodon dactylon* im Gebiet Euler-Flugplatz (ruderalisiertes *Koelerion glaucae* und ruderalisiertes *Armerio-Festucetum*) ein Problem dar. Die zunehmende Deckung dieses wuchskräftigen C4-Grases kann durch Eselbeweidung dezimiert werden, wie Feldexperimente auf dem Euler-Flugplatz zeigten (HAUSSMANN 2012, CARRILLO 2013). Fräsen bringt innerhalb von zwei Jahren keinen reduzierenden Effekt auf die Deckung von *Cynodon*, eine Abschiebung des Oberbodens dagegen schon (CARRILLO 2013). Auch in anderen Flächen im Untersuchungsgebiet gibt es punktuell invasive Vorkommen von *Cynodon*. Das Hundszahngras dringt durch ober- und unterirdische Ausläufer auf breiter Front in die Sandvegetation ein. Hier werden manuelle Maßnahmen eingesetzt (Entfernen von Pflanzmasse und von möglichst vielen Rhizomen). Eine unbeweidete Dauerfläche (Schneise bei Bickenbach, randlich des Kalksand-Kiefernwaldes) veranschaulicht, in welcher Zeit *Cynodon* eine solche Fläche einnehmen kann und dann monodominant auftritt: Die Deckung von *Cynodon* stieg von unter 5 % (Jahre 1995, 1996) auf 70 % in den Jahren 2004, 2005 (SÜSS et al. 2010 und n.p.), die gesamte Artenzahl sank von 20 im Jahre 1995 auf 9 im Jahre 2005.

Problemgehölze auf den Flächen sind vor allem *Robinia pseudacacia*, *Prunus serotina* und *Acer negundo*. Bisher sind sie in den wertvollen Sandgebieten mit mechanischen Maßnahmen (Ringeln, Stockrodung und intensive Nachsorge, s. dazu ZEHM 2008) und Beweidung erfolgreich zurückgedrängt worden.

5.4. Diasporenbank („seed bank in the soil“) und Diasporen-Niederschlag („seed rain“)

Die Diasporenbank markiert die „versteckte Diversität“ der Sandgebiete. Wir haben verschiedene Studien mit der Keimlingsemergenzz-Methode durchgeführt, d. h. Bodenproben wurden in verschiedenen Bodentiefen im März nach einem standardisierten Protokoll gezogen und anschließend für einen Zeitraum von mindestens 14 Monaten in einer Freilandanlage im Botanischen Garten exponiert. So konnte das Potenzial der Arten, die in der Diasporenbank überdauern, festgestellt werden. In einer ersten Studie (KROLUPPER 1997, KROLUPPER & SCHWABE 1998) konnten 16 Probeflächen, die die wichtigsten Vegetationstypen repräsentieren,

untersucht werden. Insgesamt keimten in den Proben (ohne Streu) 3009 Individuen, die 69 Taxa angehören (zumeist Arten). Besonders viele Individuen wurden von *Arenaria serpyllifolia*, *Sedum acre*, *Potentilla argentea*, *Erodium cicutarium* und *Saxifraga tridactylites* gefunden (absteigend in dieser Reihenfolge, s. Tab. 6 bei KROLUPPER & SCHWABE 1998), die sich nach Störungen (z. B. Viehtritt), immer wieder neu etablieren können. Auch im tieferen Bodenhorizont wurden keimfähige Diasporen von Rote Liste-Arten (HMULV 2008) gefunden (z. B. *Corynephorus canescens* und *Euphorbia seguieriana*). Insgesamt kamen in beiden Horizonten (1-6 cm und 11-16 cm) 11 Rote Liste-Arten vor.

In einer weiteren Studie verglichen wir die Diasporenbanken von *Koelerion glaucae*- und *Armerio-Festucetum*-Probeflächen (EICHBERG et al. 2006) mit derselben Methode wie oben beschrieben. Letztere waren reicher an Taxa und Individuen als die frühen Sukzessionsstadien. Die Rote Liste-Art *Vicia lathyroides* konnte in großen Individuenzahlen in beiden Horizonten gefunden werden. Neben *Vicia* wurden auch die Rote Liste-Arten *Medicago minima*, *Silene conica*, *S. otites*, *Corynephorus canescens*, *Phleum arenarium* und *Veronica praecox* nachgewiesen. 25 % der Arten waren nur in der Diasporenbank vertreten, nicht in der aktuellen Vegetation.

Der mit Trichterfallen in einer Höhe von 0,9 m ermittelte Diasporen-Niederschlag wird sehr stark von Ruderalarten wie z. B. *Conyza canadensis* bestimmt (KROLUPPER & SCHWABE 1998, EICHBERG et al. 2010, FREUND et al. 2014); dies konnte im Griesheimer Sand, im ND Rotbühl und im Bereich der Restitutionsfläche Seeheim-Jugenheim (s. Kap. 10.) festgestellt werden. Im Gebiet des östlichen Euler-Flugplatzes (*Koelerion glaucae*-Vegetationskomplex) waren neben *Conyza canadensis* auch *Verbascum phlomoides* und *Salix* spec. Hauptsippen im Diasporen-Niederschlag (FAUST 2011, FAUST et al. 2012).

6. Untersuchungen zum Verhältnis oberirdische zu unterirdische Phytomasse und zum Nährstoffhaushalt

Untersuchungsergebnisse zum Nährstoffhaushalt liegen für alle Standortstypen der Sandökosysteme vor. Erste Untersuchungen wurden von STORM et al. (1998) im Landkreis Darmstadt-Dieburg durchgeführt (s. auch KAPPES 1996). Umfangreiche Studien unter Einbeziehung von Stickstoff-Mineralisationsraten legten BERGMANN (2004) und STORM & BERGMANN (2004) vor. SCHWEBEL (2007) studierte Böden von Leitbild- und Restitutionsflächen vergleichend in einem nährstoffökologischen Ansatz. Die oberirdische und unterirdische Phytomasse wurde ausschließlich am Euler-Flugplatz analysiert. Dazu sind benachbart zu ausgewählten Aufnahme-Flächen (s. Tab. 1) Beprobungen durchgeführt worden (BERGMANN 2004, STORM & BERGMANN 2004).

Die Böden der Pionierstadien sind wenig entwickelt. Es finden sich Locker-Syroseme und Pararendzinen mit meist hoher Basensättigung (Oberboden 0-10 cm: Gesamt-N 0,03-0,05 %, Humus 0,4-1,2 %, Phosphat-P (CAL) 8-20 mg/kg). Weiter entwickelte Stadien sind durch Braunerden bzw. Bänder-Parabraunerden (z. T. mit leichter Versauerung des Oberbodens) gekennzeichnet (Gesamt-N 0,07-0,17 %, Humus 2-3 %, Phosphat-P (CAL) in nicht-ruderalisierten Beständen 8-13 mg/kg); Daten nach STORM et al. (1998). Insgesamt sind die Böden arm bis sehr arm an Humus, Stickstoff, Phosphat und Kalium. Humus und Gesamt-Stickstoff nehmen jedoch im Laufe der Sukzession von Pionierfluren zu Sand- und Steppenrasen um den Faktor 3-4 zu (STORM et al. 1998, STORM & BERGMANN 2004).

Die pH-Werte (in 0,01 mol/l CaCl₂-Suspension gemessen) liegen im Oberboden zwischen 6,1 und 7,8 (STORM et al. 1998, KROLUPPER & SCHWABE 1998 und n.p.). Punktuell treten im nördlichen Gebiet des Landkreises Darmstadt-Dieburg und bei Babenhausen auch saure Mainsande auf mit pH-Werten um 4 (KROLUPPER & SCHWABE 1998).

Untersuchungen zur unterirdischen und oberirdischen Phytomasse zeigten, dass große Teile der Phytomasse in unterirdischen Pflanzenteilen gespeichert sind. Dies trifft ganz besonders auf die Bestände des ruderalisierten *Koelerion* und des ruderalisierten *Armerio-Festucetum* zu (BERGMANN 2004). Desweiteren machen Moose und Flechten einen bedeutenden Teil der oberirdischen Phytomasse aus. Die Gesamtphytomasse (Trockenmasse) des Gradienten vom *Koelerion* zum *Armerio-Festucetum* (s. Tab. 1 und Abb. 7 von Ost nach West) lag im Jahre 2000 bei ca. 7-9 t/ha im typischen *Koelerion*, 14,5-17,5 t/ha im ruderalisierten *Koelerion*, 16 t/ha im *Armerio-Festucetum typicum* und 28 t/ha im ruderalisierten *Armerio-Festucetum* (BERGMANN 2004). Der in der Vegetationskarte und der Tabelle dargestellte Gradient ist somit auch klar durch eine unterschiedliche Phytomasse-Verteilung gekennzeichnet, und es ist leicht nachvollziehbar, dass konkurrenzschwache, kleinwüchsige und oft gefährdete Arten im östlichen Teil des Flugplatzes bessere Bedingungen haben.

Der atmosphärische N-Eintrag (nasse und trockene Deposition) lag im Gebiet Euler-Flugplatz im Jahre 2001/02 ebenso wie 2009 bei ca. $17 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ (BERGMANN 2004, FAUST 2011). Nach Daten des Umweltbundesamtes wurden 2004 in offenen Sandökosystemen im Untersuchungsgebiet $14\text{--}17 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ Stickstoff eingetragen (GAUGER et al. 2008).

Die jährliche Stickstoffnachlieferung im Bestand in 0-30 cm Bodentiefe ist in konsolidierten Rasen des *Armerion* mit durchschnittlich 135 kg/ha höher als in Pionierfluren des *Koelerion glaucae* mit durchschnittlich 52 kg/ha. Der beweidungsbedingte Netto-Entzug, d. h. die N-Aufnahme mit dem Fraß minus die N-Rückführung mit dem Dung und Urin, ist gering ($3\text{--}12 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$); nur im ruderalisierten *Armerio-Festucetum* überschreitet er mit $15\text{--}23 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ die atmogene Stickstoff-Deposition (BERGMANN 2003). Durch verbesserte Weideführung in den Folgejahren konnte die Entnahme von Phytomasse durch die Weidetiere erhöht werden.

Die Phosphatwerte im Boden spielen eine große Rolle für die Sukzessionsrichtung der Sandvegetation (s. Kap. 7.) und sind so auch von zentraler Bedeutung für Restitutionsmaßnahmen (Kap. 10.). In Leitbildflächen der Sandvegetation liegt der extrahierbare Phosphat-P-Gehalt (Calcium-Acetat-Lactat-Extrakt) unter 20 mg/kg Trockenboden (STORM et al. 1998, SCHWEBEL 2007).

7. Entwicklung der Sandvegetation in der Zeitachse: spontane Sukzession ohne Beweidung

7.1. Frühe Pionierstadien

In Pionierstadien der Sandvegetation kann die Sukzession sehr langsam voranschreiten, insbesondere wenn „Biologische Krusten“ vorhanden sind (Deckung bis 80-90 %, s. Kap. 5.). Wir konnten das mit Hilfe von drei Dauerflächen beobachten, die wir 8, 10 bzw. 13 Jahre untersucht haben (HACH et al. 2005, SÜSS et al. 2010, s. Abb. 13). Auch in einem „Common Garden“-Experiment konnte gezeigt werden, dass mehrjährige Phanerogamen durch „Biologische Krusten“ in ihrer Entwicklung inhibiert werden können (LANGHANS et al. 2009b). Durch den Tritt des Weideviehs werden solche Krusten leicht zerstört, und die Regeneration dauert mehrere Jahre (HACH et al. 2005, LANGHANS et al. 2010). Daher sind vor wenigen Jahren die Kern-Krustengebiete am Euler-Flugplatz aus der Beweidung zumindest für einen begrenzten Zeitraum herausgenommen worden. In den untersuchten 7 Dauerflächen (8-13 Jahre) ohne „Biologische Krusten“ (SÜSS et al. 2010) gab es sehr langsame Veränderungen, insbesondere Zunahmen der Moosdeckung von *Hypnum cupressiforme* var. *lacunosum*. Auch eine Abnahme des Pioniergrases *Corynephorus canescens* konnte nachgewiesen werden.



Abb. 13: Gezäunte Fläche mit dem *Sileno conicae-Cerastietum semidecandri* s. l. und initialem *Koelerion glaucae* mit „Biologischen Krusten“. Die Fläche ist seit 1996 gezäunt (hier: Foto aus dem Jahre 2009) und hat sich kaum weiterentwickelt. Außerhalb des Zauns: Schaf- und Kaninchen-beweidete Flächen. Links: hochwüchsige *Asparagus*-Triebe. (Nach SÜSS et al. 2010).

7.2. *Koelerion glaucae*-Komplex

Hier zeigten unsere Dauerflächen-Untersuchungen (6 Flächen, 7-12 Jahre, SÜSS et al. 2010) auf unbeweideten Flächen, dass die Sukzession sehr langsam fortschreitet, aber es kommt z. T. zum Erlöschen bedeutender, hoch gefährdeter Arten (in einem Fall Absterben einer *Jurinea*-Population nach 8 Jahren). *Poa badensis*, *Alyssum montanum* subsp. *gmelinii* und *Fumana procumbens* konnten sich halten. Im Laufe der Zeit kam es zu einer Ablösung des Pioniermooses *Tortula ruraliformis* durch *Hypnum cupressiforme* var. *lacunosum* (3 Flächen) und einer Zunahme von *Stipa capillata* (4 Flächen).

7.3. *Allio sphaerocephali-Stipetum capillatae*

Hier kam es in der untersuchten Zeitperiode von 9-15 Jahren (11 Flächen, SÜSS et al. 2010) z. T. zu kompletten Strukturveränderungen durch Dominanz von *Prunus spinosa* (Abb. 14), z. T. gab es Dominanzbildung von *Stipa capillata* und Artenrückgänge. Andere Flächen haben sich ohne wesentliche Änderungen der Artenstruktur halten können.



Abb. 14: Im Jahre 2000 gezäuntes *Allio-Stipetum capillatae*, das im Jahre 2008 bereits dicht mit *Prunus spinosa* überwachsen ist. Foto: A. Schwabe.

7.4. Ruderalisierende Flächen

Völlig anders sieht die Sukzessionsgeschwindigkeit in Beständen aus, die höhere Phosphatwerte im Boden aufweisen (SÜSS et al. 2004, SÜSS et al. 2010). Sie zeigen in wenigen Jahren (6 Dauerflächen, Untersuchungszeitraum 9-11 Jahre, Abb. 15) bereits eine floristische Ablösung von Pionierfluren durch *Calamagrostis epigejos*- oder *Cynodon dactylon*-dominierte Bestände. Die Auslösung einer Ruderalisierung durch Nährstoffzufuhr (insbesondere Stickstoff) konnte in einem kontrollierten Feldexperiment im *Koelerion glaucae*-Vegetationskomplex nachgewiesen werden (STORM & SÜSS 2008, FAUST et al. 2012).

7.5. Sukzessionsmodell: Pionier- bis mittlere Stadien

Die Ergebnisse der Dauerflächen-Untersuchungen und der Nährstoff-Bodenuntersuchungen fassen wir im Sukzessionsmodell der Abb. 16 zusammen. Ausgehend von den Pionierstadien und in Abhängigkeit von den Bodennährstoffen lässt sich ein nicht-ruderaler Pfad von einem ruderalen Pfad der Sukzession unterscheiden. Das Ziel des Beweidungsmanagements (s. u.) muss u. a. sein, bei nährstoffreicheren Substraten den ruderalen Pfad in den nicht-ruderalen Pfad umzulenken.

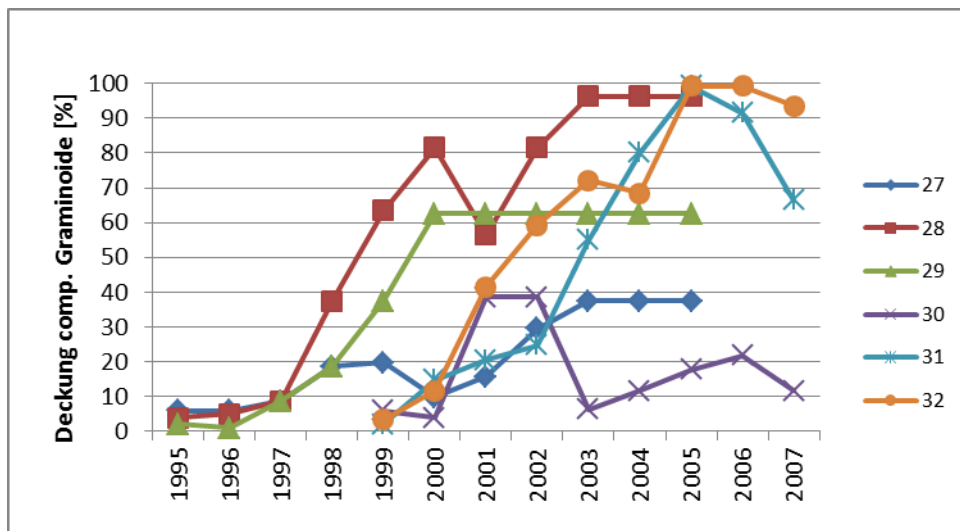


Abb. 15: Zunahme konkurrenzkräftiger Grasartiger (Gräser, Seggen) in Dauerflächen, die dem Ruderalpfad zuzuordnen sind. Einige Dauerflächen konnten über 13 Vegetationsperioden beobachtet werden (x-Achse). Jede Linie repräsentiert eine Dauerfläche im Landkreis Darmstadt-Dieburg. (Nach SÜSS et al. 2010).

7.6. Wälder

Die Entwicklung geht auf nährstoffarmen Sandstandorten hin zu *Pinus sylvestris*-reichen Ausbildungen, oft über Stadien mit *Prunetalia*-Gebüsch (s. o.). Das für kalkreiche Dünenstandorte bezeichnende *Pyrolo-Pinetum sylvestris* ist jedoch selten geworden, das gilt noch mehr für charakteristische Taxa wie *Pyrola chlorantha*, *Moneses uniflora* oder die Orchideenart *Goodyera repens* (BÖGER 1982, CEZANNE 1983, ZEUCH 1997, SCHWABE et al. 2000, 2010). *Pinus sylvestris*-Stadien stellen aber wahrscheinlich nur ein Zwischenstadium dar und wurden historisch z. B. durch Streuentnahmen gefördert, heute durch Beweidung (Abb. 17) und/oder mechanische Pflegemaßnahmen. Im großflächigen Gebiet des NSG „Kalksand-Kiefernwald bei Bickenbach, Pfungstadt und Seeheim-Jugenheim“ (87 ha) hat sich bereits in vielen Bereichen die Buche (*Fagus sylvatica*) etablieren können.

8. „Störung“ („disturbance“) – ein Faktorenkomplex zur Erhaltung offener Sandvegetation

8.1. Resilienz gegenüber abiotischen und biotischen Störungen?

Typisch ausgebildete Sandrasen erwiesen sich gegenüber Störungen als relativ resilient (FAUST et al. 2011a). Bei Störungen werden in diesem Falle Teile der pflanzlichen Biomasse beeinträchtigt, was Raum schafft, der neu besiedelt werden kann (KRATOCHWIL & SCHWABE 2001). Resilienz zeigte sich bei der Auswertung eines Langzeitdatensatzes von 10 Jahren auf dem Euler-Flugplatz gegenüber verschiedenen Störfaktoren. Bei extremen Trockenperioden (Beispiel Jahr 2003) oder starker Kaninchenbeweidung reagierte die Vegetation der Schaf-beweideten Sandvegetation mit einer Änderung der Artenzusammensetzung bzw. der Dominanzverhältnisse. Nachlassen dieser Stressfaktoren führte zu einer Erholung des Systems (FAUST et al. 2011a). Es ist allerdings unklar, wie das System auf mehrmalige Trockenperioden über mehrere Jahre hinweg reagieren würde, so wie es bei „Global Change“-Szenarien erwartet wird. Insgesamt ist von einer Resilienz bei moderaten Störungsereignissen auszugehen.

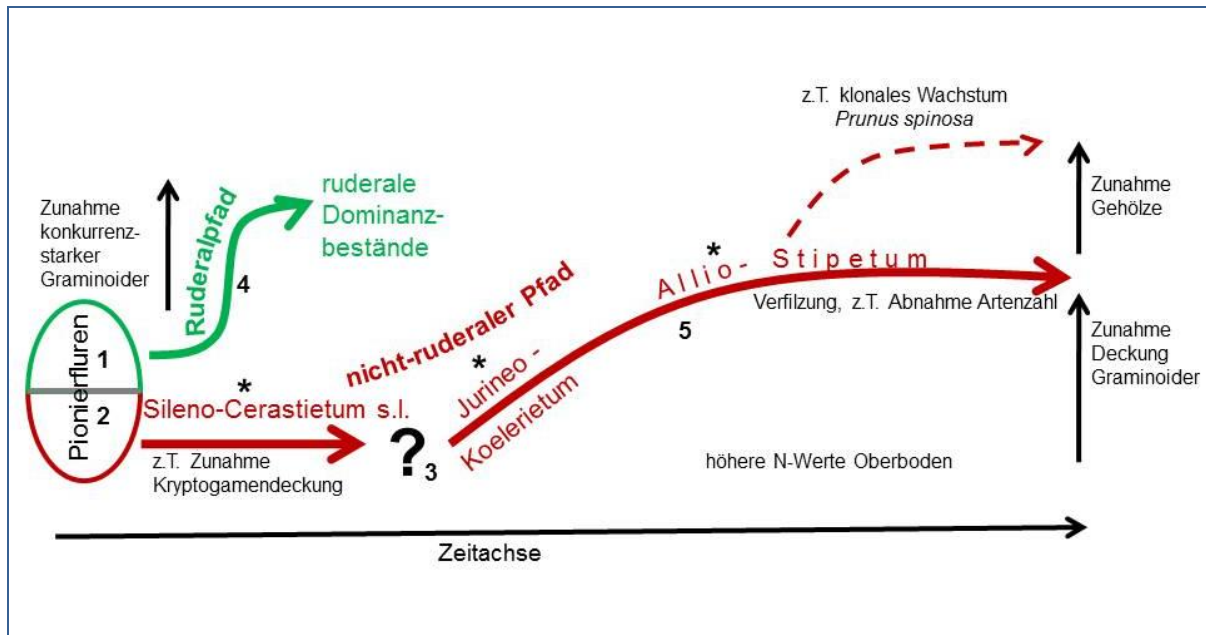


Abb. 16: Sukzessionsmodell der basenreichen Sandökosysteme des Binnenlandes in der hessischen nördlichen Oberrheinebene (frühe bis mittlere Stadien). 1) Phosphat-P > 20 mg/kg Trockenboden, initiale Feuchtezahl $\geq 3,4$. 2) Phosphat-P < 20 mg/kg, initiale Feuchtezahl < 3,4. 3) „missing link“. 4) Entwicklung innerhalb von 4-6 Jahren beobachtet. 5) Entwicklungsdauer z. T. > 14 Jahre. *Lange Stagnation möglich. (Nach SÜSS et al. 2010).



Abb. 17: Schafbeweidung des *Pyrolo-Pinetum* im NSG „Kalksandkiefernwald bei Bickenbach, Pfungstadt und Seeheim-Jugenheim“. (Nach SCHWABE et al. 2004a).



Abb. 18: *Allio- Stipetum capillatae* nach Eselbeweidung im Jahr 2008 (Juni). Links ist ein Teil einer seit dem Jahre 2000 gezäunten Fläche zu sehen, die inzwischen eine starke Dominanz von *Calamagrostis epigejos* aufweist. (Nach SCHWABE et al. 2013).



Abb. 19: Spätsommeraspekt (August 2009) derselben Fläche (Abb. 18) mit fruchtender *Stipa capillata* (außerhalb) und fruchtendem *Calamagrostis* innerhalb des Zaunes. (Nach SÜSS et al. 2011a).

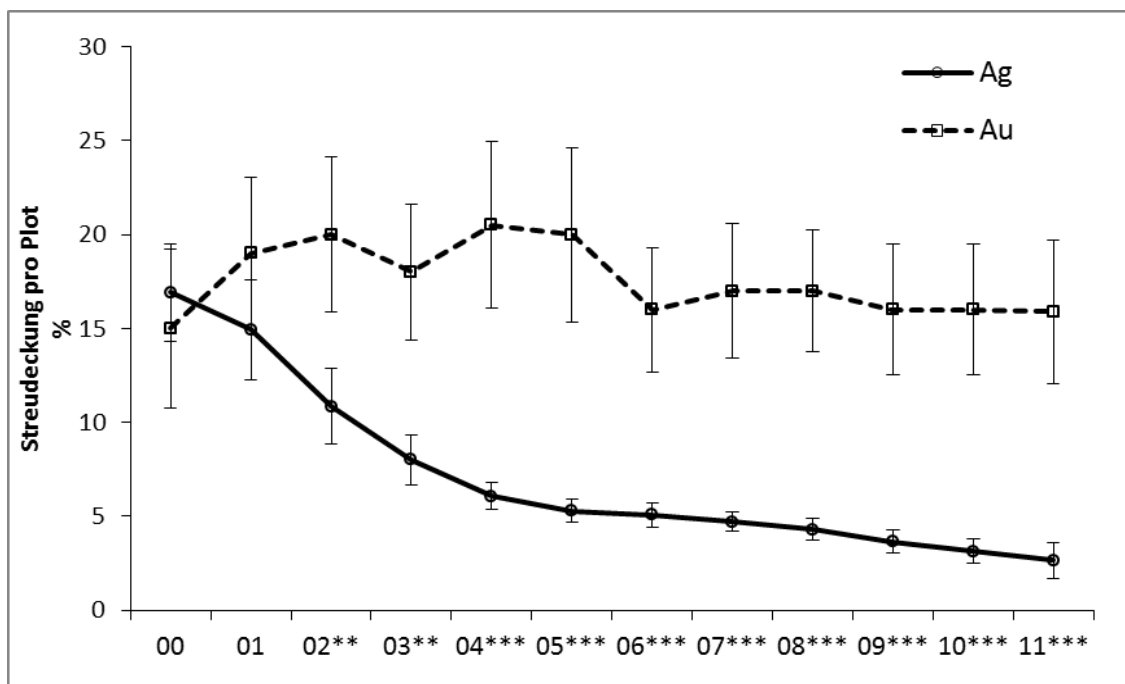


Abb. 20a: Streudeckung (%) im *Allio-Stipetum*-Vegetationskomplex von 2000 (status quo, Beginn der Beweidung im Sommer 2000 nach der Erstaufnahme) bis zum Jahre 2011: beweidete Probenflächen (Ag, n = 14) und unbeweidete (Au, n = 10). Fehlerbalken: SE (Standardfehler). Jahre mit signifikantem Unterschied zwischen Au und Ag (Basislinie Jahr 2000) sind mit Sternchen auf der x-Achse markiert. Signifikanzniveaus: *: $0.05 \geq p > 0.01$, **: $0.01 \geq p > 0.001$, ***: $0.001 \geq p$. (Nach SCHWABE et al. 2013).

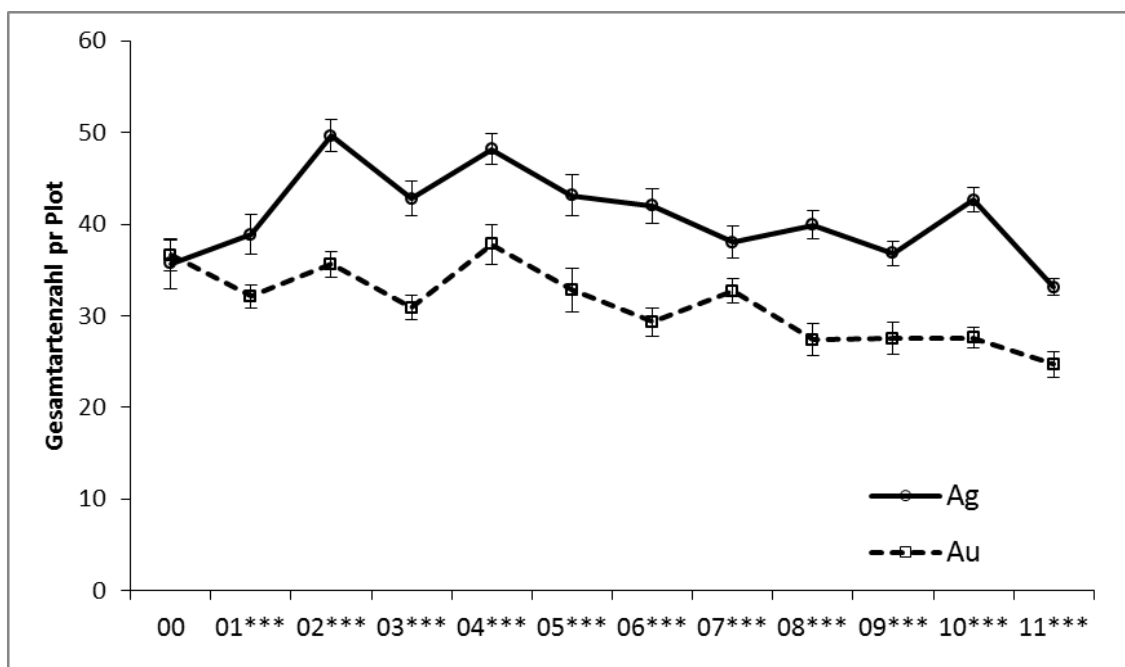


Abb. 20b: Artenzahlen der beweideten und unbeweideten Probenflächen. Fehlerbalken: SE. Weitere Details, s. Abb. 20a.

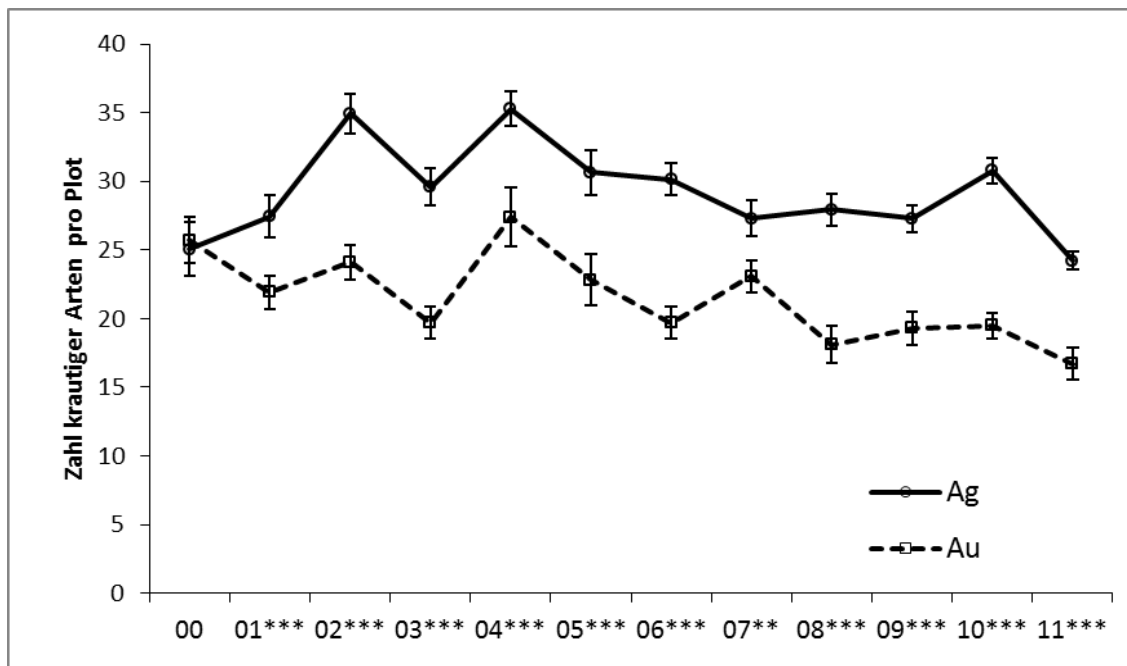


Abb. 20c: Zahl der krautigen Arten (ohne Graminoide) in beweideten und unbeweideten Probestellen. Fehlerbalken: SE. Weitere Details, s. Abb. 20a.

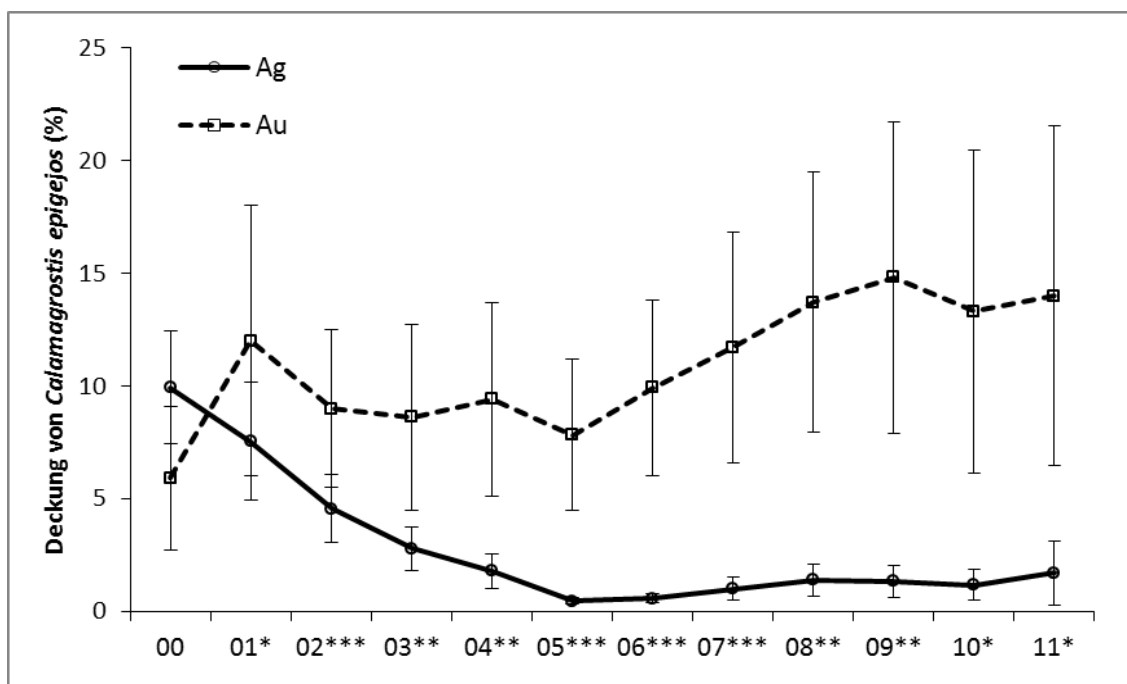


Abb. 20d: Deckung (%) von *Calamagrostis epigejos* in beweideten und unbeweideten Probestellen. Fehlerbalken: SE. Weitere Details, s. Abb. 20a.

8.2. Beweidung als dynamisierender Faktorenkomplex

8.2.1. Monitoring beweideter und unbeweideter Flächen

In verschiedenen Untersuchungsgebieten konnten wir eingezäunte Flächen (Ausschluss von Schafen und/oder Eseln) mit ungezäunten Flächen vergleichen und ein bis zu 12-jähriges Monitoring durchführen (Abb. 18, 19). Hierbei sind Unterschiede zwischen beweideten und unbeweideten Flächen in der Artenzusammensetzung und Struktur statistisch geprüft worden. Ein sehr guter Indikator für den Erfolg der Maßnahmen ist dabei die Berechnung des Zielartenindex (Target Species Ratio TSR, EICHBERG et al. 2010). Hierbei unterscheiden wir einen qualitativen (1.) und quantitativen (2.) Zielartenindex (1. Quotient aus Zielartenzahl/Gesamtartenzahl; 2. Einbeziehung der Deckung der Arten; Zielarten sind dabei Arten der *Festuco-Brometea* und *Koelerio-Corynephoretea*).

Im *Allio-Stipetum*-Vegetationskomplex an der Griesheimer Düne nahm die Streudeckung auf beweideten Flächen signifikant ab (Abb. 20a), der Anteil von Arten mit geringen Wuchshöhen (< 20 cm) erhöhte sich, und der Anteil von Arten mit Wuchshöhen von > 50 cm erniedrigte sich. Am Beginn der Untersuchungen zeigten die beweideten und unbeweideten Flächen ähnliche Artenzahlen (um 35 Arten je 79-m²-Probefläche), danach gewannen die beweideten Flächen eine hoch signifikante höhere Artenzahl über die Untersuchungszeit von 12 Jahren; insbesondere nahmen auch die Krautigen in den beweideten Flächen zu (Abb. 20 b, c). Die Artenzahl der unbeweideten Flächen fiel auf unter 30. Das konkurrenzkräftige Gras *Calamagrostis epigejos* nahm auf den beweideten Flächen ab (Abb. 20d). Leitarten zeigten in den unbeweideten Flächen eine konstante Abnahme, wohingegen sie in den beweideten Flächen zunahmen. Entsprechendes zeigte sich komprimiert bei den TSR-Werten (SCHWABE et al. 2013).



Abb. 21: Verteilungsmuster von Schaf-Weidepfaden im Gebiet des Euler-Flugplatzes (erfasst wurden zwei Koppeln). *Koelerion glaucae*-Vegetationskomplex (rechts) und *Festuca trachyphylla-/ovina* s.l.-Stadien (oben). Die Kartierung wurde anhand von Color-Infrarot-Bildern aus dem Jahre 2000 dargestellt (Stand 2002). Gelbe Linie: Weidepfad, weiße Linie: Koppelgrenze, grüne Punkte: Schattenplätze; hellblaue Punkte: Tränke und Salzleckstein. CIR-Bild aus dem BMBF-Projekt „Sandökosysteme im Binnenland“. (Nach SCHWABE et al. 2004b und EICHBERG et al. 2008).

8.2.2. Fraßpräferenzen

STROH et al. (2002) stellten bei Untersuchungen in Sand-Lebensräumen fest, dass Ruderalarten im Vergleich zu den Zielarten der Sand-Lebensräume von der Schafherde zeitlich früher und stärker verbissen wurden. Diese Selektivität kann zur Erhöhung des Naturschutzwertes beitragen („restorative grazing“, s. Kap. 10.4.). Durch geschickte Weideführung wird erreicht, dass die Herde zunächst in stärkerem Maße solche ruderalen Arten frisst. Wenn die Ressourcen Stickstoff-reicher Pflanzenarten erschöpft sind, zieht die Herde weiter.

Untersuchungen von SÜSS & SCHWABE (2007) und SÜSS et al. (2009) zeigten, dass sukzessive Multispezies-Beweidung (zuerst Schafe, danach Esel) besonders gut geeignet ist, um ruderalisierte Bestände im Sinne des Naturschutzes zu entwickeln. So erzeugen z. B. Esel einen starken Fraßdruck auf die funktionelle Gruppe der Grasartigen, die auch Problemgräser, wie *Calamagrostis epigejos* oder das invasive Gras *Cynodon dactylon* (s. Kap. 5.3.), enthält.

8.2.3. Entstehung von Offenboden-Stellen durch Weidetiere

Offenboden entsteht in beweideten Sand-Lebensräumen oft in Form von Sonderstrukturen, wie Weidepfaden (Abb. 21). Die Vegetation solcher Pfade in konsolidierter Vegetation ist unter den Bedingungen des angewendeten Managements (kurze Beweidungs- und lange Erholungsphasen; Kap. 4.) durch einen Pioniercharakter gekennzeichnet, der ein früheres Sukzessionsstadium charakterisiert als seine Umgebung. Dies konnte mit Hilfe von Ordinationen dargestellt werden (SCHWABE et al. 2004b). Weidepfade können im *Koelerion glaucae-/Armerio-Festucetum*-Vegetationskomplex bis ca. 1 % der Koppelfläche ausmachen (EICHBERG et al. 2008). Insgesamt 7 einjährige typische Sandarten (*Medicago minima* u. a.), die von Schafen zoochor ausgebreitet werden (Kap. 9.), aber auch der kurzzeitigen (1-5 Jahre) Diasporenbank angehören (EICHBERG et al. 2006), traten auf Weidepfaden in höherer Artmächtigkeit auf als auf Vergleichsflächen im benachbarten konsolidierten Rasen (EICHBERG et al. 2008).

In einem Vergleich von Schaf- und Eselbeweidung (s. Kap. 8.2.2.) zeigte sich, dass die Offenbodenanteile bei Eselbeweidung höher sind als bei Schafbeweidung; noch höher sind sie bei der sukzessiven Kombination (SÜSS & SCHWABE 2007). Eselbeweidung ist sehr stark durch die Anlage von Wälzkuhlen gekennzeichnet (Abb. 22), die hohe Offenboden-Anteile verursachen und die Regeneration von Pflanzenarten, z. B. aus der Diasporenbank im Boden, ermöglichen (HÄFELE 2004, SÜSS & SCHWABE 2007).

Weitere Offenboden-Sonderstrukturen sind Schlafkuhlen, die bestimmte Schafrassen (Skudden) in Pionierstadien gelegentlich anlegen.

9. Schafe als Vektoren zwischen den Flächen: Diasporen-Ausbreitung und Nach-Ausbreitungsschicksal von Diasporen

9.1. Diasporen-Dichte und -Diversität in Faeces und Fell

Es konnte in den Untersuchungen von EICHBERG (2005) und WESSELS (2007) festgestellt werden, dass 100 g Trockenfaeces von Schafen, die in frühen oder mittleren Sukzessionsstadien der Sandvegetation weideten, im Mittel 92-481 keimfähige Diasporen enthalten (methodische Untersuchungen zum Diasporengehalt in Faeces s. WESSELS & SCHWABE 2008). Hochgerechnet bedeutet das für eine Schafherde von 800 Tieren, dass in offener Sandvegetation am Tag rund

0,5-2,5 Mio. Samen bzw. Früchte endozoochor ausgebreitet werden können (Tab. 2). Zugrunde gelegt wurde hierbei eine tägliche Faecesmenge pro Tier von 665 g Trockenmasse (EICHBERG & WESSELS-DE WIT 2011). Im Fell konnten in denselben Sandpflanzengesellschaften pro 100 cm² im Mittel 12-36 Diasporen am Ende einer Weideportion festgestellt werden. Das bedeutet für einen Koppelwechsel der Schaferde, dass ein Potenzial von mindestens 0,3 Mio. Diasporen epizoochor von Fläche zu Fläche transportiert wird (EICHBERG 2005, WESSELS 2007, EICHBERG & WESSELS-DE WIT 2011). Hochwüchsige Arten (> 0,3 m) waren im Schaffell signifikant häufiger vertreten als niedrigwüchsige Arten (\leq 0,3 m; WESSELS et al. 2008).

Insgesamt konnten 93 Gefäßpflanzenarten/-taxa im Fell (Fe) und in den Faeces (Fa) nachgewiesen werden (Fe 53, Fa 74). Die beiden Ausbreitungspfade ergänzten sich: Eine zeitgleiche Untersuchung beider Pfade ergab auf dem Euler-Flugplatz eine 34 %-ige Übereinstimmung der Artenspektren (EICHBERG 2005). Im Fell erreichten andere Arten höhere Diasporendichten als in den Faeces (Tab. 2). Im Fell dominierten qualitativ und quantitativ Zielarten, in den Faeces z. T. Nicht-Zielarten (z. B. hohe Werte für die konkurrenzstarke, ruderal geprägte Art *Carex hirta*). Für den endozoochoren Ausbreitungspfad konnte aber auch gezeigt werden, dass das Verhältnis von Zielarten zu Nicht-Zielarten auf der Prozessstufe der Etablierung steigt (EICHBERG & WESSELS-DE WIT 2011; Kap. 9.3.). Eine Top-Art im Fell war die gefährdete Art *Medicago minima* (Kategorie 3 in Hessen, HMULV 2008); WESSELS et al. (2008). Diese sowohl in der Zeit („dispersal in time“; Kap. 5.4.) als auch auf beiden zoochoren Pfaden räumlich ausgebreitete Art („dispersal in space“) nutzt mehrere Regenerationsstrategien, die durch Weidetiere beeinflusst werden (Kap. 5.4., 8.2.3. und 9.3.). Insgesamt konnten 14 Rote Liste-Arten nachgewiesen werden, die endo- und/oder epizoochor ausgebreitet werden (EICHBERG & WESSELS-DE WIT 2011, s. Tab. 2).



Abb. 22: Charakteristische Wälzkuhle, die bei Eselbeweidung angelegt wird (Griesheimer Düne); es kommt hier zu Sandflug und einer Aktivierung der Diasporenbank. Foto: A. Schwabe.

Tabelle 2: Übersicht der im Fell und in Faeces nachgewiesenen Pflanzenarten. Es sind die Mittelwerte von 2-4 Schafen koppelbezogen, in einer vierstufigen Skala dargestellt. Die Arten sind geordnet nach 1. Ausbreitungspfad, 2. Artengruppe und 3. Menge. (Nach EICHBERG & WESSELS-DE WIT 2011).

Vegetationstyp Anzahl Koppeln	AG	Studien zur Endozoochorie							Studien zur Epizoochorie						
		Kg		Ac		AF		AS	Kg		Ac	AF		AS	
		1	2	1	3	4	1	1	1	2	1	3	2	2	
		intra	intra	inter	intra	intra	intra	inter	intra	inter (v/n)	intra	intra	inter (v/n)	inter (v/n)	
Methode der Diasporenbestimmung		CG	CG	CG	CG	CG	TH	TH/ CG	D	D	D	D	D	D	
Referenz		1	2	3	1	1	3	3	4	4	4	4	4	4	
a) Nachweis in Fell und Faeces															
<u>Zielarten</u>															
<i>Potentilla argentea</i> agg.	Z	•••	••	••	••	••	•••	••			○	○	○		
<i>Arenaria serpyllifolia</i> agg.	Z	○	•	•	○	•	••	•••/••	•			○	○	-/○	
<i>Trifolium arvense</i>	Z			•	•		•	••/•••			○		-/○	•	
<i>Rumex acetosella</i> s.l.	Z	○	•	○		•	•••	••/•				○	○	-/○	
<i>Phleum arenarium</i> (2/3)	L	○	○	••							○				
<i>Medicago minima</i> (3/3)	L	○	○	•	○	○	○	○	•••	•••/••	••	••	••	••	
<i>Koeleria macrantha</i> (-/3)/ <i>glauca</i> (2/2)	L	○			○	○		-/○	•		•	••	••/•		
<i>Vulpia myuros</i>	Z	○	○	•	○	○	○		••	○/•	••	•	•		
<i>Centaurea stoebe</i>	Z		f		○					•/-	••	••	○/•	•	
<i>Silene otites</i> (3/3)	L				○					-/○	•	○			
<i>Silene conica</i> (3/3)	L		○	○			○	-/○	○	○/-	○	○	-/○		
<i>Erodium cicutarium</i>	Z		○						○	○		○		○/-	
<i>Petrohragia prolifera</i>	Z					○	○	○		-/○				○	
<i>Myosotis ramosissima/ stricta</i>	Z/Z		○	○			f	f			○		○/-		
<i>Carex praecox</i> (3/V)	L		○					-/○				○			
<u>Ruderalarten</u>															
<i>Poa angustifolia</i>	G	••	•	•	••	••	•	•	•		•	•	•/-	-/○	
<i>Oenothera biennis</i> s.l.	R			•	••	○	•				•	•	○/-		
<i>Bromus hordeaceus</i>	R								○	○	•	•	-/○	-/○	
<i>Conyza canadensis</i>	R		○	○				••						•	
<i>Sisymbrium altissimum</i>	R							-/○		•			•	•	
<i>Psyllium arenarium</i>	R			••			f			-/○	○				
<i>Polygonum aviculare</i> agg.	R		○	•			f			○/-					
<i>Berteroa incana</i>	R					○		-/○		○		○			
<i>Silene latifolia</i> ssp. <i>alba</i>	R					○						○			
<u>Sonstige</u>															
<i>Verbascum phlomoides</i>	S			••	○	○	•••	•••			○	•	••	••	
<i>Agrostis capillaris</i> (-/-)/ <i>vinealis</i> (-/V)*	S/L			○	•	••	•	○				○	○/•		
<i>Festuca ovina</i> agg.	S	○				○	○		•	○/-	•	••	•/○		
<i>Arabis glabra</i>	S							•/○					○/•	•	
<i>Achillea millefolium</i>	S				○		○	•/○						○/-	
<i>Plantago lanceolata</i>	S			○	○	○				○/-		○	-/○		
<i>Taraxacum</i> sect. <i>Ruderalia</i>	S	○				○					○				
<i>Cerastium holsteoides</i>	S	○	○									○			
<i>Crepis capillaris</i>	S					○	f				○				
b) Nachweis nur in Faeces															
<u>Zielarten</u>															
<i>Trifolium campestre</i>	Z	○	••	••	•	○	•	••							
<i>Medicago falcata</i> (inkl. <i>M. x varia</i>)	Z			•	••	••		○							
<i>Helianthemum nummularium</i> s.l.	Z							•/••							
<i>Veronica verna</i> (-/3)	L	○	•	○		○	•								
<i>Vicia lathyroides</i> (-/3)	L	○	•			○	○	○/-							
<i>Sedum acre</i>	Z			•	○	○	○	○							
<i>Cerastium semidecandrum</i>	Z	○	○	○	○	○	○	○/-							
<i>Erophila verna</i> s.l.	Z		○	○											
<i>Saxifraga tridactylites</i>	Z		○												
<i>Herniaria glabra</i>	Z			○	○										
<i>Ononis repens</i>	Z			○			f								
<i>Corynephorus canescens</i> (-/3)	L			○											
<i>Acinos arvensis</i>	Z							-/○							
<i>Asperula cynanchica</i> (-/V)	L							○/-							
<u>Ruderalarten</u>															
<i>Carex hirta</i>	G	•••	•••	○	•	•	○	-/○							
<i>Veronica arvensis</i>	R	•	••	•	•	•	••	••/○							
<i>Chenopodium album/ strictum</i>	R			•			f	••/•							
<i>Urtica dioica</i>	R							••/•							
<i>Diplotaxis tenuifolia</i>	R			•				○							
<i>Stellaria media</i>	R		○	○				○							
<i>Cynodon dactylon</i>	G	○	○					f							
<i>Cerastium arvense</i>	R	○				○									
<i>Setaria viridis</i>	R			○				-/○							
<i>Arabidopsis thaliana</i>	R		○												
<i>Amaranthus</i> sp.	R			○											
<i>Eragrostis minor</i>	R			○											
<i>Saponaria officinalis</i>	R			○											
<i>Convolvulus arvensis</i>	R							-/○							
<i>Rubus caesius</i>	R							-/○							
<i>Salsola kali</i> ssp. <i>tragus</i>	R		f												

Tab. 2 (Forts.)

	AG	Studien zur Endozoochorie							Studien zur Epizoochorie						
Vegetationstyp		Kg		Ac	AF		AS		Kg		Ac	AF		AS	
Anzahl Koppeln		1	2	1	3	4	1	1	1	2	1	3	2	2	
Gebietsbezug		intra	intra	inter	intra	intra	intra	inter	intra	inter (v/n)	intra	intra	inter (v/n)	inter (v/n)	
Methode der Diasporenbestimmung		CG	CG	CG	CG	CG	TH	TH/CG	D	D	D	D	D	D	
Referenz		1	2	3	1	1	3	3	4	4	4	4	4	4	
b) Nachweis nur in Faeces															
Sonstige															
Geranium molle	S	○	●	○		○	○	○/-							
Thymus pulegioides s.l.	S			○		○		●							
Salix sp.	S	○	○		○										
Hypericum perforatum	S				○	○		○							
Buddleja cf. davidii	S		○		○										
Luzula campestris	S			○				○							
Galium album	S				○										
Betula pendula	S					○									
Epilobium ciliatum	S					○									
Poa annua	S					○									
c) Nachweis nur im Fell															
Zielarten															
Phleum phleoides (-/3)	L										●●				
Stipa capillata (3/3)	L													●●	
Armeria maritima ssp. elongata (3/3)	L								○	○	○	○	○	●	
Echium vulgare	Z												○		
Ruderalarten															
Bromus tectorum	R								●	●●/●	●	●	●/○	●/○	
Cynoglossum officinale	R								○	○/-	○	●	●	●●	
Papaver dubium s.l.	R									○/-	○	○	●		
Calamagrostis epigejos	G										○	○			
Elymus repens/ campestris x repens	G/R								○				○/-		
Bromus sterilis	R									○				-/○	
Galium aparine	R													○	
Sonstige															
Agrimonia procera	S													●●	
Campanula rapunculus	S												●		
Arrhenatherum elatius	S								○		○				
Alopecurus pratensis	S								○						
Rumex thyrsiflorus	S									-/○					
Senecio jacobaea	S									○					
Holcus lanatus	S												○		
Festuca rubra	S												-/○		

Endozoochorie: o = ≤ 1 Diaspore 100 g⁻¹ trockene Faeces (tF), • = $> 1-5$ D. 100 g⁻¹ tF, •• = $> 5-50$ D. 100 g⁻¹ tF, ••• = > 50 D. 100 g⁻¹ tF; f = endozoochorer Nachweis ausschließlich unter Feldbedingungen. Epizoochorie: o = $\leq 0,1$ D. 100 cm⁻² Fell (F), • = $> 0,1-1$ D. 100 cm⁻² F, •• = $> 1-10$ D. 100 cm⁻² F, ••• = > 10 D. 100 cm⁻² F.

AG = Artengruppen: Rote Liste-Arten (L), sonstige Zielarten (Z), konkurrenzstarke Graminoide (G), sonstige Ruderalarten (R), sonstige Arten (S). In Klammern hinter den Artnamen: Gefährdungskategorien in Deutschland (KORNECK et al. 1996)/Hessen (HMULV 2008). * = beide Arten qualitativ nachgewiesen, aber nicht in allen Studien quantitativ trennbar. Vegetationstyp: Kg = *Koelerion glaucae*, Ac = *Artemisia campestris*-Gesellschaft, AF = *Armerio-Festucetum trachyphyllae*, AS = *Allio-Stipetum capillatae*. Gebietsbezug: intra/inter = Untersuchungen innerhalb eines Gebietes/u. bei Gebietswechseln der Schafe (es sind die Werte vor/nach [v/n] dem Wechsel dargestellt). Bestimmungsmethode: CG = "common garden"-Auflaufverfahren, D = direkte Diasporenbestimmung; TH: Ter Heerdt-Auflaufverfahren (TER HEERDT et al. 1996). Referenzen: 1: EICHBERG (2005), 2: EICHBERG et al. (2007), 3: WESSELS (2007), 4: WESSELS et al. (2008).

9.2. Verweilzeit von Diasporen im Fell

Die großen und schweren Achänen von *Jurinea cyanooides* (0,6 cm lang, 7,6 mg schwer) verweilen bei einem Freilandexperiment trotz ihrer Haaranhängsel nur kurze Zeit im Fell der Schafe: 82 % der Achänen fielen innerhalb von 2 h wieder aus (EICHBERG et al. 2005). Ein kleiner Teil (5 %) verblieb jedoch länger als 52 h im Fell. Die Befunde dieser Studie sind in ein allgemeines Modell zur Retention bei externem Diasporentransport durch Säugetiere eingegangen (BULLOCK et al. 2011).

Die ebenfalls mit länglichen Anhängseln versehenen Diasporen von *Stipa capillata* und *Agrimonia procera* wurden im Rahmen eines weiteren Feldexperiments von der Griesheimer Düne zum Euler-Flugplatz im Fell transportiert (Distanz: 3 km; WESSELS et al. 2008; Abb. 9, 23). Die

Ausfallraten dieser Diasporen zeigten eine starke Abhängigkeit von den Körperzonen des Schafes (Abb. 23). Die Diasporen-Verlustrate auf den Empfängerflächen war bei *Stipa* höher als bei *Agrimonia*. Weitere Untersuchungen von WESSELS et al. (2008) belegten, dass es während der Wechsel der Weideflächen über eine Distanz von 3 km über ein breites Artenspektrum hinweg kaum zu Diasporen-Verlusten aus dem Schaffell kam. Die absoluten Mengen an Diasporen im Fell waren nur bei einem sehr geringen Anteil der Pflanzenarten je Bestand (< 10 %, abhängig vom Körperbereich) bei Ankunft auf der Empfängerfläche gegenüber dem Triftstart auf der Quellfläche signifikant verringert.

Diese Ergebnisse zeigen, dass die funktionelle Vernetzung über Kilometer entlang der Weideroute bestehen kann.

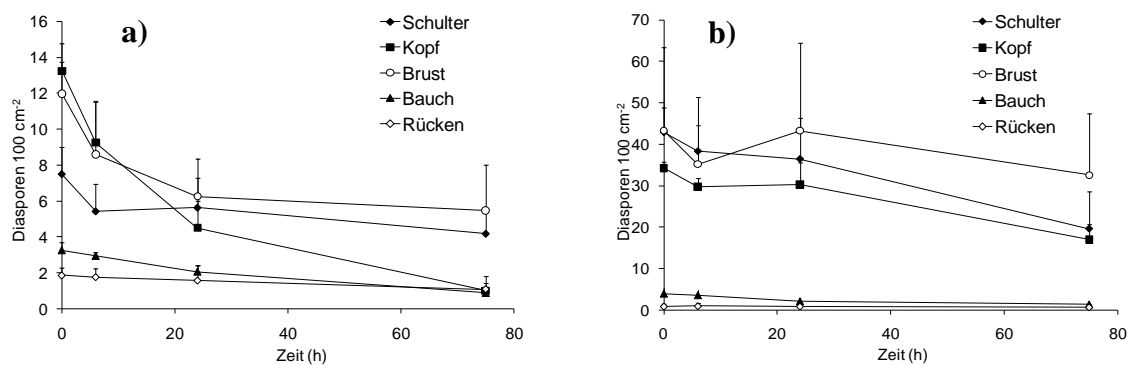


Abb. 23: Mittlere Verweilzeiten von Diasporen von *Stipa capillata* (a) und *Agrimonia procera* (b) in verschiedenen Fellbereichen von vier Schafen (rechte + linke Körperseite, je Individuum und Körperbereich gemittelt). Zwischen dem ersten (0 h) und zweiten Messzeitpunkt (6 h) hat ein Gebietswechsel der Herde stattgefunden (ca. 3 km). Fehler: Standardfehler (einseitig). (Nach EICHBERG & WESSELS-DE WIT 2011).

9.3. Nach-Ausbreitungsschicksal und Etablierungserfolg der von Schafen transportierten Diasporen

Bei Untersuchungen zum Nachausbreitungsschicksal von endozoochor transportierten Diasporen wurde jeweils ein „Common Garden“-Ansatz im Botanischen Garten unter optimierten Bedingungen (Dungpillen mechanisch zerkleinert, kontinuierliche Wasserversorgung) mit einem Freilandansatz (Dungpillen intakt, natürlicher Wasserhaushalt) verglichen. Hierbei zeigte sich, dass die trocken-heißen Pionier-Sandstandorte am Euler-Flugplatz wie ein Umweltfilter wirken. In einer Untersuchung keimten im „Common Garden“ insgesamt 28 Pflanzenarten, und pro 100 g Trockenmasse Faeces traten im Mittel 124 Individuen auf, im Freiland waren es 15 Arten und 6 Individuen (EICHBERG et al. 2007). Im Freiland fruktifizierten faecesbürtige Individuen von nur 5 Arten: *Vulpia myuros* (Abb. 24) und 4 Arten der Roten Liste Hessen (HMULV 2008): *Medicago minima* (Abb. 25 a, b), *Silene conica*, *Phleum arenarium* und *Vicia lathyroides*. Denkt man an die Geilstellen mesophiler Weiden, so erscheint es zunächst paradox, dass gerade diese konkurrenzschwachen Arten sich unter den potenziell nährstoffreichen Bedingungen der Dungstellen etablierten, aber Wasserlimitierung ist hier sehr wahrscheinlich der ausschlaggebende Faktor. Unter den in Pionierfluren herrschenden Freilandbedingungen keimten auf Schafdung praktisch keine ruderalen oder klonalen Arten, wohl aber im „Common Garden“. Insgesamt gab es hohe Absterberaten im Freiland durch die harschen Umweltbedingungen (EICHBERG et al. 2007). In

degradiertem, produktivem Sandgrasland mit mesophileren mikroklimatischen Bedingungen wurden vereinzelt faecesbürtige Keimlinge kompetitiver Arten nachgewiesen (z. B. *Cynodon dactylon*, WESSELS 2007).

Die Etablierungsraten der als Diasporen in Dungpillen vorhandenen Pflanzen können durch Schaftritt erhöht werden, so dass Schafe quasi als „Gärtner“ fungieren; und zwar nicht nur für die Diasporen in Schafdung. FAUST et al. (2011b) belegten experimentell, dass Schafe den Keimlingsemergenz- und Fruchterfolg von Diasporen signifikant förderten, die in Kaninchen- oder Schafdung eingebettet waren, der auf Offenbodenstellen ausgelegt und mit Hufatruppen betreten worden war (Abb. 26). Die Hufaktivität brach die Dungpillen auf und verbesserte den Dung-Boden-Kontakt. Die Kombination aus Offenboden, Faeces und Trittstörung ist offenbar etablierungsfördernd. Dieser Faktorenkomplex herrscht auch auf Weidepfaden (Abb. 21, Kap. 8.2.3.).

Die Etablierung nach epizoochorem Transport und die räumlichen Muster neuer Pflanzenspopulationen konnten für 10 Pflanzenarten (zumeist Zielarten) über 6 Jahre auf drei diasporenarmen Tiefsand-Aufschüttungen studiert werden (WESSELS-DE WIT & SCHWABE 2010, FREUND et al. 2014). Die Etablierung über diesen Zeitraum war für die meisten Arten erfolgreich. Bei einigen Arten war es möglich nachzuweisen, dass das ursprünglich durch die Schafe initiierte Verteilungsmuster auf den Flächen noch nach 6 Jahren bestand (FREUND et al. 2014).



Abb. 24: Ein aus Schaffaeces aufgelaufenes, fruchtendes Individuum von *Vulpia myuros* (Euler-Flugplatz, August 2003). Maßstab der Kästchen: 0,5 cm x 0,5 cm. Foto: C. Eichberg.



Abb. 25a: Individuum von *Medicago minima*, das auf einer Experimentalfläche (15 cm x 15 cm) im *Koelerion glaucae* des Euler-Flugplatzes direkt aus Schaffaeces aufgelaufen ist und durch ein rotes Stäbchen markiert wurde. Ein Vogelschutznetz und Drahtbügel fixierten die Faecespillen. Die in der ersten Nachausbreitungs-Generation gebildeten Früchte wurden durch rote Kreise hervorgehoben (Juni 2003). Foto: C. Eichberg.



Abb. 25b: *Medicago minima*, aus Faeces aufgelaufen (Mai 2004). (Nach EICHBERG & WESSELS-DE-WIT 2011).

Schaftritt fördert auch die Inkorporation von freien (nicht in Faeces eingebetteten) Diasporen in den Boden und führt zu einer signifikant erhöhten Keimlingszahl und -überlebensrate; dies konnte von EICHBERG et al. (2005) und WESSELS-DE WIT & SCHWABE (2010) für die Art *Jurinea*

cyanoides nachgewiesen werden (Abb. 27). Bei Störung durch Tritt sind im Mittel 14 % der Achänen von *Jurinea* komplett in den Boden inkorporiert worden, auf unbeweideten Kontrollflächen wurden im gleichen Zeitraum dagegen keine Diasporen in den Boden eingearbeitet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass Schafe durch mehrere, miteinander gekoppelte Prozesse auf die generative Vermehrung der Pflanzenarten in offenen Sandhabitaten einwirken. Der Ausbreitungserfolg für eine Pflanzenart durch den Vektor Schaf ist also nicht allein vom Transportvermögen des Tieres her zu beurteilen.

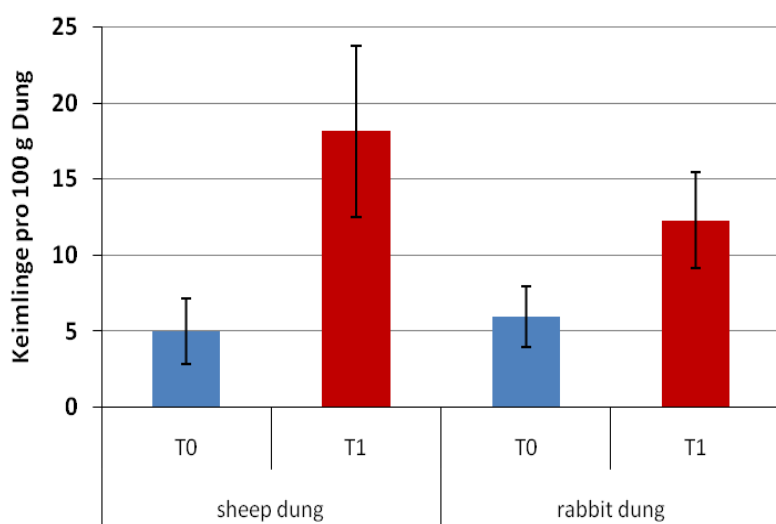


Abb. 26: Aufgelaufene Keimlinge im Schaf- und Kaninchendung am Euler-Flugplatz nach Tritteinfluss (T1) durch Schafe und ohne Tritteinfluss (T0). Durch den Einfluss des Schaftritts ist die Zahl der Keimlinge bei Schafdung 3,6-fach höher, bei Kaninchendung 2,1-fach höher. Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant; Fehlerbalken: \pm 95% Konfidenzintervall. (Nach Daten von FAUST et al. 2011b).

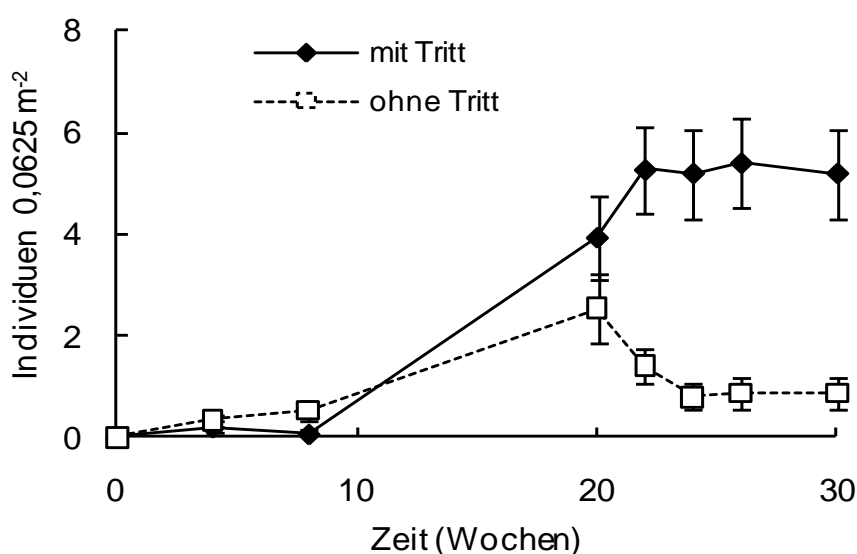


Abb. 27: Einfluss von Schaftritt auf die Keimlings-Emergenz und -Mortalität von *Jurinea cyanoides* (verändert nach WESSELS-DE WIT & SCHWABE 2010). Fehlerbalken: Standardfehler.

10. Das Instrument der Restitution („ecological restoration“)

10.1. Allgemeines

Unter ökologischer Restitution („ecological restoration“) verstehen wir den Prozess, die „Erholung“ („recovery“) von einem Ökosystem zu unterstützen, das degradiert, stark gestört oder zerstört wurde (nach SER International Primer on Ecological Restoration. Society for Ecological Restoration International. Version 2: October, 2004. www.ser.org). Diese Unterstützung kann sich auf die abiotische Restitution beziehen (z. B. auf die Nährstoffreduzierung von Bodensubstrat, auf die biotische Restitution (z. B. auf die Komplettierung der Restitutionsfläche mit fehlenden Pflanzen- oder Tierarten) oder auf beide Aspekte (SCHWABE & KRATOCHWIL 2009).

Hintergrund der Restitutionsmaßnahmen auf Sandstandorten in der Oberrheinebene ist die Notwendigkeit, die sehr kleinen Flächen mit den Restpopulationen von Pflanzen- und Tierarten wieder räumlich zu vernetzen, so dass große zusammenhängende Flächen mit großen Populationen entstehen (Abb. 28). Als Restitutionsflächen kommen vor allem ehemalige Äcker oder auch Sonderflächen (z. B. ehemalige Bauschuttdeponien) in Frage; erstere weisen in der Regel hohe Phosphatwerte im Boden auf. In einem ersten Pilotprojekt in der Gemeinde Seeheim-Jugenheim konnten Techniken der biotischen Restitution erprobt werden (STROH et al. 2002, STROH 2006, STROH et al. 2007, STROH 2011); später sind auch Techniken zur abiotischen Renaturierung in der Kombination mit biotischen Ansätzen eingesetzt worden (STROH 2006, EICHBERG et al. 2010). Als langfristiges Management werden die untersuchten Flächen beweidet, wobei es hier Erfahrungen mit Esel- und Schafbeweidung gibt (SÜSS & SCHWABE 2011).

10.2. Abiotische Maßnahmen

Bei hohen Phosphatwerten besteht nach unserem Sukzessionsmodell (Kap. 7.5.) die Prognose, dass sich eine Fläche in die Richtung „Ruderalpfad“ entwickelt (SÜSS et al. 2004). Durch die Techniken der Tiefensand-Aufschüttung oder der Profilinversion kann dieses verhindert werden. Eine solche Tiefensand-Aufschüttung wurde im Gebiet Seeheim-Jugenheim eingesetzt (Abb. 28, 29), um eine kleine FFH-Fläche mit einer Alt-Restitutionsfläche zu verbinden (STROH & DIETZE 2011). Die Profilinversion, d. h. die Aufbringung des nährstoffarmen Tiefensandes an die Oberfläche und die Verlagerung des ehemaligen Ackerbodens in die Tiefe des Profils, wurde im ND Rotbühl im Rahmen einer Ausgleichsmaßnahme eingesetzt (Abb. 30). Durch die Bodenprofilinversion war es möglich, die Phosphat-P-Gehalte (CAL-Extrakte) im Oberboden von rund 200 mg/kg Trockensubstanz in jungen Ackerbrachen auf Werte um 20 mg/kg zu senken, was den Leitbildflächen mit 10-20 mg/kg nahekommt. Abb. 31 zeigt die Erfolge der abiotischen Restitutionsmaßnahmen für die Reduktion der Phosphatgehalte im Boden.



Abb. 28: Luftbild des Tiefensand-Korridors in Seeheim-Jugenheim am 8.11.2005, der ein kleines oben im N anschließendes FFH-Gebiet (ND Seeheimer Düne) mit einer Alt-Restitutionsfläche im Süden verbindet. Foto: M. Stroh (mit freundlicher Unterstützung der AG Strömungslehre und Aerodynamik der TU Darmstadt).



Abb. 29: Schafbeweidung südlich des Korridors aus der Abb. 28 im Mai 2005 auf der Alt-Restitutionsfläche aus dem Jahre 1999. Im Hintergrund der Melibokus im Odenwald. Foto: A. Schwabe.



Abb. 30: Profilumkehr im Gebiet ND Rotböhl. Das kleine Naturdenkmal wurde um ehemalige Äcker erweitert, die im Rahmen von Ausgleichsmaßnahmen abiotisch restituiert werden konnten. Dies geschah mit einer Profilumkehr. Der nährstoffreiche Oberboden wird in die Tiefe gebracht, der Tiefensand an die Oberfläche verlagert. (Nach SÜSS et al. 2011a).

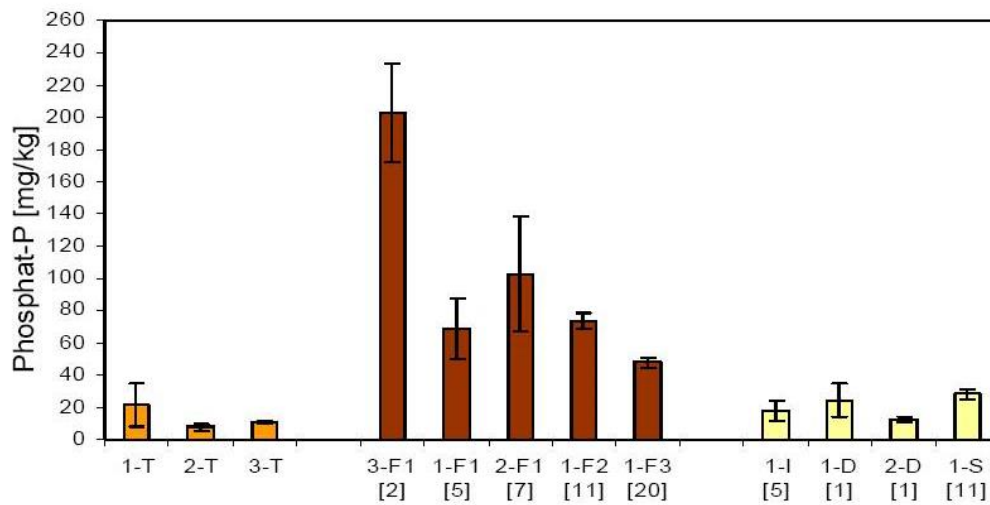


Abb. 31: Boden-Phosphat-P-Gehalte auf Leitbildflächen (T), ehemaligen Äckern ohne abiotische Restitution (F) und Flächen mit abiotischer Restitution (I Bodeninversion, D Tiefensand-Aufschüttung, S Sandaufschüttung). 1 Rotbühl, 2 Seeheim-Jugenheim, 3 Griesheimer Düne als Leitbildfläche, Streitgewann als Restitutionsfläche). Fehlerbalken: mittlere absolute Abweichung vom Mittelwert (n = 2-7). In eckigen Klammern: Alter zum Zeitpunkt der Beprobung. (Nach SÜSS et al. 2011a).

10.3. Biotische Maßnahmen

Ein großes Problem bei neu angelegten Flächen ist die Diasporenlimitierung. Die Diasporenbank der Substrate degradierter Bestände ist arm an Habitat-typischen Arten; speziell bei ehemaligen Äckern ist diese stark ruderal geprägt. Auch der Diasporeneintrag durch den Wind ist durch ruderale Arten geprägt, wie z. B. *Conyza canadensis* (Kap. 5.4.). Am Rotbühl wurden auf ehemaligen Äckern nach Profilinversion 9 Arten (darunter eine Zielart) gefunden, und die Diasporendichte in den obersten 6 cm des Bodens betrug im Mittel nur 133 m⁻². Der Diasporeneniederschlag enthielt nur zu 5 % Zielarten (sechs Arten) (STROH 2006, EICHBERG et al. 2010). Hierbei liegen in diesem Gebiet die Leitbildflächen sehr nah zu den Versuchsflächen; wahrscheinlich stammen jedoch die Funde z. T. sogar aus den inokulierten Parzellen des Versuchs.

Es wurden Techniken entwickelt, Leitbildflächen zu mähen oder auszurechen und das Mahd- bzw. Rechgut auf Restitutionsflächen aufzubringen (ZEHM 2004b, EICHBERG et al. 2010). Unter „Rechen“ versteht man im Rahmen der ökologischen Restitution eine Technik, bei der Material von Leitbildflächen manuell oder maschinell gewonnen wird. Dieses Rechgut enthält Streu, Moose, Flechten, etwas Oberbodenmaterial und die in diesen Bestandteilen angesammelten Diasporen. Es erweist sich demnach als eine sehr wertvolle, initiale Diasporenquelle für die naturschutzfachlich erwünschte Entwicklung von Restitutionsflächen (Abb. 32).



Abb. 32: *Bassia laniflora*-Keimlinge mit *Tortula ruraliformis* im Maiaspekt auf einer Restitutionsfläche in Seeheim-Jugenheim. Die Art erreichte diese Fläche nach biotischer Inokulation. Foto: A. Schwabe.



Abb. 33: Alt-Restitutionsfläche in Seeheim-Jugenheim auf einer ehemaligen Bauschutt-Deponie mit sukzessiver Schaf- (s. Abb. 29)/Eselbeweidung; dritte Vegetationsperiode. Die eingezäunte unbeweidete und nicht inokulierte Fläche ist durch den Aspekt des Neophyten *Erigeron annuus* geprägt. Im Hintergrund auf der Esel-beweideten Fläche: *Echium vulgare*. (Nach SCHWABE & KRATOCHWIL 2004).



Abb. 34: „Restorative grazing“ auf der Alt-Restitutionsfläche in Seeheim-Jugenheim im Juni 2006. Viele *Koelerio-Corynephoretea*-Sippen haben ihre Vegetationsperiode schon beendet und sind vertrocknet (Vordergrund); die Tiere fressen in starkem Maße nährstoffreichere Pflanzensippen. Foto: A. Schwabe.



Abb. 35: Erste Eselbeweidung auf dem 2005 neu geschaffenen Korridor (Abb. 28) im Oktober 2006. Die Haupt-Nahrungspflanzen für die Esel waren zu dieser Zeit *Artemisia campestris* und *Salsola kali* subsp. *tragus*. (Nach SCHWABE & KRATOCHWIL 2004).

10.4. Entwicklung der restituierten Flächen in der Zeitachse

Die Entwicklung von Flächen mit rein biotischer Restitution ist durch ein stetiges sehr starkes ruderales Potenzial gekennzeichnet und muss mit Hilfe von „restorative grazing“ kontrolliert werden (Abb. 33, 34); das zeigten die 11-jährigen Untersuchungen von STROH (2011). Bei der kombinierten abiotisch-biotischen Restitution am Seeheim-Jugenheimer Korridor konnten EICHBERG et al. (2010) nachweisen, dass eine spezifische Entwicklung der Empfängerflächen, jeweils in Richtung auf die Spenderflächen, erfolgt. Nach einer Periode von 9 Jahren ergibt sich das in Tab. 3 gezeigte Bild bezüglich der gefährdeten Pflanzenarten. Die Zahl der Rote Liste-Arten erhöhte sich von 2 auf 18 in 5 Jahren und liegt inzwischen bei 19 (2013). Arten der Gefährdungskategorie 1 und 2, wie *Alyssum*gmelinii* und *Euphorbia seguieriana*, wachsen mit hoher Stetigkeit auf dem Korridor (Tab. 3), wobei *Alyssum* auch eine der bedeutenden Arten für blütenbesuchende, gefährdete Wildbienen ist (KRAUSCH 2011). Auch das quantitative Vorkommen der genannten Pflanzenarten ist hoch. Der Zielartenindex zeigte bereits nach 4 Jahren, dass die anteilmäßige Ausstattung der Restitutionsflächen mit Zielarten nicht viel schlechter war als die der Leitbildflächen (EICHBERG et al. 2010). Auch hier muss jedoch durch Beweidung das typische Mosaik von Pionierfluren und konsolidierteren Rasen erhalten werden (Abb. 35).

Tabelle 3: Stetigkeiten von Rote Liste-Pflanzenarten (Hessen, SCHÖLLER 1997, HMULV 2008) in einem Tieflandsand-Korridor, der 2005 aufgeschüttet wurde (Seeheim-Jugenheim). Daten von M. Stroh (n.p.), Flächengröße je Plot: 79 m².

Jahr	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Zahl der Flächen	6	6	6	6	6	6	6	6	6
<i>Cladonia*subrangiformis</i>	67	100	100	100	100	100	100	100	100
<i>Thymus serpyllum</i>	17	33	50	50	67	67	83	83	83
<i>Alyssum*gmelinii</i>	.	33	67	67	100	100	100	100	100
<i>Fumana procumbens</i>	.	17	17	33	67	67	67	67	67
<i>Medicago minima</i>	.	67	100	100	100	100	100	100	100
<i>Phleum arenarium</i>	.	17	33	50	67	67	67	67	83
<i>Poa badensis</i>	.	17	33	33	50	67	67	67	67
<i>Silene conica</i>	.	67	67	50	83	100	83	83	83
<i>Euphorbia seguieriana</i>	.	.	50	67	83	83	83	100	100
<i>Koeleria glauca</i>	.	.	17	17	17	50	50	50	50
<i>Phleum phleoides</i>	.	.	33	50	83	83	100	100	100
<i>Veronica verna</i>	.	17	.	.	33	33	17	17	17
<i>Koeleria macrantha</i>	.	.	.	17	17	17	17	17	17
<i>Stipa capillata</i>	.	.	.	17	33	17	17	17	17
<i>Bassia laniflora</i>	33	33	50	50	50
<i>Peltigera rufescens</i>	50	83	83	100	83
<i>Silene otites</i>	50	67	67	67	67
<i>Vicia lathyroides</i>	17	17	17	17	50
<i>Cetraria aculeata</i>	17	17

11. „Ried und Sand“: Zusammenführung von Naturschutz, Beweidung und Tierernährung

Das Erprobungs- und Entwicklungsvorhaben „Ried und Sand – Biotopverbund und Restitution durch extensive Landbewirtschaftung“ (s. Kap. 1.), verknüpfte insbesondere die naturschutzfachlich wichtigen Aspekte zum Schutz der Sandvegetation mit der Funktionsfähigkeit der Tierhaltung. Ein zentraler Punkt war es, die bestehenden und restituierten Lebensräume in einem räumlichen Verbund zu entwickeln sowie funktionelle Vernetzungen über die Weidetiere als Vektoren zu ermöglichen (Kap. 9.). Durch den Wechsel der Schafherde zwischen mageren Sandflächen und „fetteren“ Riedflächen (ehemalige Altneckarschlingen) sollte auch die Tierernährung verbessert werden. Nach den Ergebnissen des E+E-Vorhabens (SÜSS et al. 2011b) lässt sich die erwünschte Vernetzung bezüglich der Tierernährung, die als defizitär im BMBF-Projekt (SCHWABE & KRATOCHWIL 2004) erkannt worden war, durch Verknüpfung älterer Ried-Grünlandflächen oder ruderaler Sandflächen mit mageren Sandflächen erreichen. Eine Beweidung von Riedflächen im Frühjahr ist gerade in der Laktationsphase der Muttertiere von Bedeutung. Junge Ackerbrachen im Ried sind ungeeignet, da sie eine sehr hohe „ruminale Stickstoffbilanz“ aufweisen (SÜSS et al. 2011b). Die notwendige Pflege der Sandgebiete konnte mit der Schafherde und z. T. zusätzlich mit Eselbeweidung (z. B. bei höherer Dominanz von *Calamagrostis epigejos*) sehr gut erreicht werden. Eine reine Eselbeweidung war auf sehr kleinen oder abgelegenen Flächen erfolgreich. In den Riedflächen fand auch noch eine Rinderbeweidung statt, bei der jedoch eine enge Bindung an die frisch-feuchten Flächen bestand. Auch Restitutionsmaßnahmen sind im Ried experimentell untersucht worden (FRITSCH et al. 2011, FRITSCH 2012).

Alle Befunde, die in den Kapiteln 4-10 dargestellt werden, finden sich unter dem „Ried und Sand“-Aspekt als Voraussetzung für einen erfolgreichen Verbund. Der Flächenverbund mit Leitbildflächen, restituierten Trittsteinen und funktionellen Vernetzungen durch Weidetiere sowie mit wüchsigen und weniger wüchsigen Flächen erwies sich als sehr gut geeignet, um ein aus der Sicht des Naturschutzes exzellentes Beweidungssystem zu etablieren.

Die hochwertigen landschaftspflegerischen Leistungen des hier etablierten Beweidungssystems sind leider im Projektzeitraum noch nicht ausreichend entlohnt worden; somit sind die betriebswirtschaftlichen Ergebnisse nicht befriedigend (MÄHRLEIN 2011). Es ist zu hoffen, dass in Zukunft solche Leistungen in höherem Maße bezahlt werden können.

12. Gesichtspunkte für den Naturschutz

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass die einzigartige und so spezifische Sandvegetation der nördlichen Oberrheinebene, deren Existenz stark gefährdet ist, in weiten Teilen durch gezieltes Management erhalten und entwickelt werden kann. Beweidung mit Schafen als Grundpflege und/oder mit Eseln in besonderen Fällen (abgelegene Lage, kleine Flächen, Dominanz konkurrenzstarker Gräser oder Seggen) hat sich bewährt. Lediglich bei ganz initialen Beständen mit „Biologischen Krusten“ kann (und sollte) auf eine solche Pflege verzichtet werden.

Die Dauerflächen-Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Pflege absolut notwendig ist, da es sonst zu Sukzessionsprozessen und Verlust der hohen Diversität kommt.

Wichtige Aufgaben für den Naturschutz sind (s. dazu auch SCHWABE et al. 2013):

- 1) Für unser Gebiet gibt es eine ganz besonders hohe Verantwortung zur optimalen Pflege der Vorkommen subkontinental geprägter Sandvegetation, u. a. da es sich mit um die westlichsten Vorkommen des Mosaiks der FFH-Typen 6120 und 6240 handelt.
- 2) Große Populationen der Leitbildarten sollten erhalten und entwickelt werden, um das Langzeit-Überleben zu sichern; auf der Ebene der Flächen sollten FFH-Typen durch Restitutionsmaßnahmen vergrößert werden.
- 3) Die Management-Maßnahmen sollten nicht nur vom vegetationsökologischen Blickwinkel beurteilt werden, sondern auch unter Berücksichtigung zoologischer Leitarten. So können auch Flecken, die durch ruderale Krautige bestimmt werden, große Bedeutung haben, z. B. für gefährdete Wildbienenarten (BEIL et al. 2014). Beispielsweise sind *Malva alcea*, *Berteroa incana* und *Sisymbrium altissimum* wichtige Pollenlieferanten (BEIL 2007). *Malva* nahm in der Stetigkeit in den beweideten Flächen an der Griesheimer Düne zu (SCHWABE et al. 2013); diese Art ist die Pollenressource der gefährdeten Wildbienenart *Tetralonia macroglossa* (Abb. 36). Das Beweidungsmanagement sollte an die Sicherung von Pollenressourcen angepasst werden, z. B. durch Staffelnbeweidung kleiner Koppeln.

Wenn optimale Beweidungsstrategien von Leitbildflächen kombiniert werden mit Ansätzen der ökologischen Restitution (Flächenvergrößerung, Schaffung neuer „stepping stones“), entsteht ein Beweidungsnetzwerk, das als Instrument eines modernen Naturschutzes auch übertragbar ist auf verschiedene andere Ökosystem-Typen.



Abb. 36: Die gefährdete Bienenart *Tetralonia macroglossa* ernährt sich oligophag von Pollenressourcen der *Malva*-Sippen (hier an der Griesheimer Düne *Malva alcea*). *Malva* nahm an Stetigkeit auf den beweideten Flächen zu; die Blütenressourcen müssen jedoch z. B. durch Staffelnbeweidung geschont werden. (Foto: A. Schwabe, 28.06.2008).

Literatur

(Anmerkung: Das Literaturverzeichnis enthält auch unveröffentlichte Zulassungsarbeiten, die aber in der Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt öffentlich zugänglich sind.)

- AL MUFTI, M.M., SYDES, C.I., FURNESS, S.B., GRIME, J.P. & BAND, S.R. (1977): A quantitative analysis of shoot phenology and dominance in herbaceous vegetation. – J. Ecol. 65: 759–791.
- AMBOS, R. & KANDLER, O. (1987): Einführung in die Naturlandschaft. – Mainzer Naturwiss. Archiv 25: 1–28.
- BEIL, M. (2007): Blütenbesuchende Wildbienen-Gemeinschaften (Hymenoptera, Apoidea) in Sand-Ökosystemen. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 147 pp.
- BEIL, M. (2011): Bundes- und Landesmonitoring der Sand-Silberschärpe (*Jurinea cyanoides*) in Hessen (prioritäre Art der Anhänge II und IV der FFH-Richtlinie) und Bewertung nach dem Bundesbewertungsschema der Begehung 2008 sowie Beurteilung der Umsetzung des landesweiten Artenhilfskonzeptes. – Land Hessen, vertreten durch Hessen Forst FENA, Gießen.
- BEIL, M., HORN, H. & SCHWABE, A. (2008): Analysis of pollen loads in a wild bee community (Hymenoptera: Apidae) - a method for elucidating habitat use and foraging distance. – Apidologie 39: 456–467.
- BEIL, M. & KRATOCHWIL, A. (2004): Zur Ressourcennutzung von Wildbienen (Hymenoptera, Apoidea) in beweideten und unbeweideten Sand-Ökosystemen. – In: SCHWABE, A. & KRATOCHWIL, A. (Eds.): Beweidung und Restitution als Chancen für den Naturschutz? NNA-Berichte 17: 179–189.
- BEIL, M., KRATOCHWIL, A., STORM, C. & SCHWABE, A. (2014): Community structure and diversity of vegetation and flower-visiting wild bees (Hymenoptera: Apoidea) in sandy dry grassland: are there congruent characteristics? – Phytocoenologia 44 (3-4): 175–192.
- BEIL, M. & ZEHR, A. (2006): Erfassung und naturschutzfachliche Bewertung der hessischen Vorkommen von *Jurinea cyanoides* (L.) Rchb. (FFH-Anhang-II-Art). – Natur und Landschaft 81: 177–184.
- BELNAP, J. & LANGE, O.L. (2001): Biological Soil Crusts. Structure, Function and Management. – Springer, Berlin-Heidelberg (Ecological Studies 150): 503 pp.
- BERG, C., DENGLER, J. & ABDANK, A. (Eds.) (2001): Die Pflanzengesellschaften Mecklenburg-Vorpommerns und ihre Gefährdung. Tabellenband. – Weissdorn-Verlag, Jena: 341 pp.
- BERG, C., DENGLER, J., ABDANK, A. & ISERMANN, M. (Eds.) (2004): Die Pflanzengesellschaften Mecklenburg-Vorpommerns und ihre Gefährdung. Textband. – Weissdorn-Verlag, Jena: 606 pp.
- BERGMANN, S. (2004): Zum Nährstoffhaushalt in Sandökosystemen der nördlichen Oberrheinebene: Sukzession, Ruderalisierungsprozesse und Effekte von Schafbeweidung. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 232 pp.
- BÖGER, K. (1982): Der Bergsträßer Kiefernwald. Floristische Verhältnisse und ihre Wandlungen in jüngster Zeit. – Staatsexamensarbeit Technische Hochschule Darmstadt: 118 pp.
- BRANDES, D. & NITZSCHE, J. (2007): Verbreitung, Ökologie und Soziologie von *Ambrosia artemisiifolia* L. in Mitteleuropa. – Tuexenia 27: 167–194.

-
- BULLOCK, J.M., GALSWORTHY, S.J. ; MANZANO, P., POSCHLOD, P., EICHBERG, C., WALKER, K. & WICHMANN, M.C. (2011): Process-based functions for seed retention on animals: a test of improved descriptions of dispersal using multiple data sets. – *Oikos* 120: 1201–1208.
- CARRILLO, J. (2013): Vegetationsökologische Untersuchungen zur Eselbeweidung, Endozoochorie und zum Management von *Cynodon dactylon* in Sandökosystemen. – Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt: 110 pp.
- CEZANNE, R. (1983): Über die Pflanzendecke offener und bewaldeter Flugsandstandorte bei Darmstadt, auch unter Naturschutzgesichtspunkten. – Diplomarbeit Technische Hochschule Darmstadt: 168 pp.
- EICHBERG, C. (2005): Plant-diaspore pools and processes in inland sand ecosystems: soil seed banks, epi- and endozoochory. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 140 pp.
- EICHBERG, C., BOES, J. & SCHWABE, A. (2008): Which vegetation and seed-bank changes are induced by the disturbance regime of livestock trails in open sand ecosystems? – *Abh. Westfäl. Mus. Nat.kd.* 70: 63–80 (Festschrift Fred Daniëls).
- EICHBERG, C., STORM, C., KRATOCHWIL, A. & SCHWABE, A. (2006): A differentiating method for seed bank analysis: validation and application to successional stages of *Koelerio-Corynephoretea* inland sand vegetation. – *Phytocoenologia* 36: 161–189.
- EICHBERG, C., STORM, C. & SCHWABE, A. (2005): Epizoochorous and post-dispersal processes in a rare plant species: *Jurinea cyanoides* (L.) Rchb. (Asteraceae). – *Flora* 200: 477–489.
- EICHBERG, C., STORM, C. & SCHWABE, A. (2007) Endozoochorous dispersal, seedling emergence and fruiting success in disturbed and undisturbed successional stages of sheep grazed inland sand ecosystems. – *Flora* 202: 3–26.
- EICHBERG, C., STORM, C. STROH, M. & SCHWABE, A. (2010): Is the combination of topsoil replacement and inoculation with plant material an effective tool for the restoration of threatened sandy grassland? – *Appl. Veg. Sci.* 13: 425–438.
- EICHBERG, C. & WESSELS-DE WIT, S. (2011): Schafe als Ausbreitungsvektoren von Samen und Früchten und als Faktoren für den Etablierungserfolg dieser Diasporen in offenen Sand-Ökosystemen. – In: SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (Bearb.): Ried und Sand: Biotopverbund durch extensive Landbewirtschaftung. Naturschutz und Biologische Vielfalt 110: 137–162. Bonn – Bad Godesberg.
- FAUST, C. (2011): Succession and disturbance in a successional gradient: impact of crucial abiotic and biotic factors. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 124 pp.
- FAUST, C., SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (2011a): Threatened inland sand vegetation in the temperate zone under different types of abiotic and biotic disturbances during a ten-year period. – *Flora* 206: 611–621.
- FAUST, C., EICHBERG, C., STORM, C. & SCHWABE, A. (2011b): Post-dispersal impact on seed fate by livestock trampling – a gap of knowledge. – *Basic Appl. Ecol.* 12: 215–226.
- FAUST, C., STORM, C. & SCHWABE, A. (2007): Kaninchen-Beweidung im *Armerio-Festucetum trachyphyllae*: Blühphänologie, Phytomasse-Entzug und Fraßpräferenzen. – *Hercynia N.F.* 40: 177–192. (Festschrift Hartmut Dierschke).
- FAUST, C., STORM, C. & SCHWABE, A. (2012): Shifts in plant community structure of a threatened sandy grassland over a 9-year period under experimentally induced nutrient regimes: is there a lag phase? – *J. Veg. Sci.* 23: 372–386.

- FREUND, L., EICHBERG, C., RETTA, I. & SCHWABE, A. (2014): Seed addition via epizoochorous dispersal in restoration: an experimental approach mimicking the colonization of bare soil patches. – *Appl. Veg. Sci.* 17: 74–85.
- FRITSCH, M. (2012): Vegetationsökologische Untersuchungen zum Management und zur Restitution von Feuchtgrünland. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 138 pp.
- FRITSCH, M., DROBNIK, J., STORM, C. & SCHWABE, A. (2011): Etablierung von Zielarten des *Cirsio tuberosi-Molinietum* nach Bodenabtrag im Bereich von entwässerten Altneckar-Schlingen (Hessen). – *Tuexenia* 31: 127–151.
- GAUGER, TH., HAENEL, H.-D., RÖSEMANN, C., DÄMMGEN, U., BLEEKER, A., ERISMAN, J.W., VERMEULEN, A.T., SCHAAP, M., TIMMERMANN, R.M.A., BUILTJES, P.H.H., DUYZER, J.H., NAGEL, H.-D., BECKER, R., KRAFT, P., SCHLUTOW, A., SCHÜTZE, G., WEIGELT-KIRCHNER, R. & ANSHELM, F. (2008): Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben FKZ 204 63 252: National Implementation of the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution Effects. Braunschweig.
- GRIME, J.P. (1973): Competitive exclusion in herbaceous vegetation. – *Nature* 242: 344–347.
- HACH, T., BÜDEL, B. & SCHWABE, A. (2005): Biologische Krusten in basenreichen Sand-Ökosystemen des Koelerion glaucae-Vegetationskomplexes. – *Tuexenia* 25: 357–372.
- HÄFELE, S. (2004): Effekte der Eselbeweidung auf die Vegetation von Sand-Ökosystemen. – Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt: 81 pp.
- HAUSSMANN, A. (2012): Vegetationsökologische Untersuchungen zur Eselbeweidung, Epizoochorie und zum Management von *Cynodon dactylon* in Sandökosystemen. – Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt: 122 pp.
- HENSEN, I., KILIAN, C., WAGNER, V., DURKA, W., PUSCH, J. & WESCHE, K. (2010): Low genetic variability and strong differentiation among isolated populations of the rare steppe grass *Stipa capillata* L. in Central Europe. – *Plant Biology* 12: 526–536.
- HMULV (HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, LÄNDLICHEN RAUM UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (2008): Rote Liste der Farn- und Samenpflanzen Hessens. – Wiesbaden: 186 pp.
- HODVINA S. & BUTTLER, K.P. (2002): Historische und aktuelle Verbreitung des Zwerggrases (*Mibora minima*) in Hessen. – *Botanik Naturschutz Hessen* 14: 91–118.
- HODVINA S. & CEZANNE, R. (2007a): Das Dünen-Steinkraut (*Alyssum montanum* subsp. *gmelinii*) in Hessen. – *Botanik Naturschutz Hessen* 20: 25–51.
- HODVINA S. & CEZANNE, R. (2007b): Das Zwerg-Sonnenröschen (*Fumana procumbens*) in Hessen. – *Botanik Naturschutz Hessen* 19: 43–67.
- HODVINA S. & CEZANNE, R. (2007c): Der Acker-Schwarzkümmel (*Nigella arvensis*) in Hessen. – *Botanik Naturschutz Hessen* 20: 61–88.
- HODVINA S. & CEZANNE, R. (2008a): Die Sand-Radmelde (*Bassia laniflora*) in Hessen. – *Botanik Naturschutz Hessen* 21: 89–113.
- HODVINA S. & CEZANNE, R. (2008b): Das Badener Rispengras (*Poa badensis*) in Hessen. – *Botanik Naturschutz Hessen* 21: 33–60.
- HODVINA S., CEZANNE, R., SCHWAB, R. & HUTH, W. (2009): Das Dolden-Winterlieb (*Chimaphila umbellata*) in Hessen. – *Botanik Naturschutz Hessen* 22: 107–141.
- KAPPES, J. (1996): Untersuchungen zur Nährstoffökologie ruderalisierter und nicht-ruderalisierter Sandvegetation. – Diplomarbeit Technische Hochschule Darmstadt: 86 pp.

-
- KORNECK, D. (1974): Xerothermvegetation in Rheinland-Pfalz und Nachbargebieten. – Schriftenr. Vegetationsk. 7: 1–196. Bonn-Bad Godesberg
- KORNECK, D., SCHNITTNER, M. & VOLLMER, I. (1996): Rote Liste der Farn- und Blütenpflanzen (Pteridophyta et Spermatophyta) Deutschlands. – Schriftenr. Vegetationsk. 28: 21–187. Bonn-Bad Godesberg.
- KRATOCHWIL, A., BEIL, M. & SCHWABE, A. (2009) Complex structure of pollinator-plant interaction-webs: random, nested, with gradients or modules? – *Apidologie* 40: 634–650.
- KRATOCHWIL, A. & SCHWABE, A. (2001): Ökologie der Lebensgemeinschaften. – Ulmer, Stuttgart: 756 pp.
- KRAUSCH, S. (2011): E+E-Vorhaben „Ried und Sand“: Erfolge bei der Restitution von Sandlebensräumen für Wildbienen. – In: SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (Bearb.) Ried und Sand: Biotopverbund durch extensive Landbewirtschaftung. Naturschutz und Biologische Vielfalt 110: 215–234. Bonn – Bad Godesberg.
- KRAUSCH, S. (2012): Analyse blütenbesuchender Wildbienengemeinschaften (Hymenoptera: Apoidea) in gefährdeten Sand-Ökosystemen Süddeutschlands (Baden-Württemberg, Hessen): Gemeinschaftsstruktur, Diversität, Ressourcennutzung, Restitution. – Dissertation Universität Osnabrück: 235 pp.
- KROLUPPER, N. (1997): Untersuchung des Diasporenreservoirs und -niederschlags in Sandtrockenrasen und die Bedeutung für die Restitution von Flächen. – Diplomarbeit Technische Hochschule Darmstadt: 120 pp.
- KROLUPPER, N. & SCHWABE, A. (1998): Ökologische Untersuchungen im Darmstadt-Dieburger Sandgebiet (Süd Hessen): Allgemeines und Ergebnisse zum Diasporenreservoir und Niederschlag. – *Bot. Naturschutz Hess.* 10: 9–39.
- LANGHANS, T.M. [geb. Hach] (2008): Biological soil crusts in a temperate sand ecosystem: community assembly, disturbance, successional stages and interactions with vascular plant species. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 123 pp.
- LANGHANS, T.M., STORM, C. & SCHWABE, A. (2009a): Community assembly of Biological Soil Crusts of different successional stages in a temperate sand ecosystem, as assessed by direct determination and enrichment techniques. – *Microbial Ecology* 58: 394–407.
- LANGHANS, T.M., STORM, C. & SCHWABE, A. (2009b): Biological soil crusts and their microenvironment: Impact on emergence, survival and establishment of seedlings. – *Flora* 204: 157–168.
- LANGHANS, T.M., STORM, C. & SCHWABE, A. (2010): Regeneration processes of biological soil crusts, macro-cryptogams and vascular plant species after fine-scale disturbance in a temperate region: recolonization or successional replacement? – *Flora* 205: 46–60.
- LEHMANN, S., PERSIGHEIL, M., ROSENKRANZ, B., FALKE, B., GÜNTHER, J. & ASSMANN, T. (2004): Laufkäfer-Gemeinschaften xerothermer Sandrasen und ihre Abhängigkeit von Beweidungsmaßnahmen. – Schriftenr. Landschaftspfl. Naturschutz 78: 119–127.
- MÄHRLEIN, A. (2011): Sozioökonomische Bewertung des E+E-Vorhabens „Ried und Sand“. – In: Süss, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (Bearb.) Ried und Sand: Biotopverbund und Restitution durch extensive Landbewirtschaftung. Naturschutz und biologische Vielfalt 110: 297–322. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.
- PAETZ, U. (1999): Das Vegetationsmosaik des NSG „Ehemaliger August-Euler-Flugplatz“ unter Berücksichtigung der Steinschmätzer (*Oenanthe oenanthe*)-Brutgebiete (mit einer Vegetationskarte im Maßstab 1:2000). – Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt: 55 pp.

- PERSIGHEHL, M., LEHMANN, S., VERMEULEN, H.J.W., ROSENKRANZ, B., FALKE, B. & ASSMANN, T. (2004): Kolonisation restituierter Sandrasen im Darmstädter Flugsandgebiet und im mittleren Emsland durch Laufkäfer. – In: SCHWABE, A. & KRATOCHWIL, A. (Eds.): Beweidung und Restitution als Chancen für den Naturschutz? – NNA-Berichte 17: 161–178.
- ROSENTHAL, G., SCHRAUTZER, J. & EICHBERG, C. (2012): Low-intensity grazing with domestic herbivores: A tool for maintaining and restoring plant diversity in temperate Europe. – *Tuexenia* 32: 167–205.
- SCHÖLLER, H. (1997): Rote Liste der Flechten (Lichenes) Hessens. – Hess. Min. des Innern und für Landwirtschaft, Forsten und Naturschutz. Wiesbaden: 76 pp.
- SCHWABE, A. & KRATOCHWIL, A. (2004) (Eds.): Beweidung und Restitution als Chancen für den Naturschutz? – NNA-Berichte 17: 1–237.
- SCHWABE, A. & KRATOCHWIL, A. (2009): Renaturierung von Sandökosystemen im Binnenland. – In: ZERBE, S. & WIEGLEB, G. (Eds.): Renaturierung von Ökosystemen in Mitteleuropa: 235–263. Spektrum, Heidelberg.
- SCHWABE, A., STORM, C., ZEUCH, M., KLEINE-WEISCHEDE, H. & KROLUPPER, N. (2000): Sandökosysteme in Südhessen: Status quo, jüngste Veränderungen und Folgerungen für Naturschutz-Maßnahmen. – *Geobot. Kolloqu.* 15: 25–45.
- SCHWABE, A., SÜSS, K. & STORM, C. (2013): What are the long-term effects of livestock grazing in steppic sandy grassland with high conservation value? Results from a 12-year field study. – *Tuexenia* 33: 189–212.
- SCHWABE, A., SÜSS, K., STORM, C., BÖGER, K. & CEZANNE, R. (2010): Basenreiche Sandstandorte in der hessischen Rheinebene. – *Tuexenia Beih.* 3: 41–64. Göttingen.
- SCHWABE, A., ZEHM, A., NOBIS, M., STORM, C. & SÜSS, K. (2004a): Auswirkungen von Schaf-Erstbeweidung auf die Vegetation primär basenreicher Sand-Ökosysteme. – In: SCHWABE, A. & KRATOCHWIL, A. (Eds.): Beweidung und Restitution als Chancen für den Naturschutz? – NNA-Berichte 17: 39–53.
- SCHWABE, A., ZEHM, A., EICHBERG, C., STROH, M., STORM, C. & KRATOCHWIL, A. (2004b): Extensive Beweidungssysteme als Mittel zur Erhaltung und Restitution von Sand-Ökosystemen und ihre naturschutzfachliche Bedeutung. – *Schriftenr. Landschaftspfl. Naturschutz* 78: 63–92.
- SCHWEBEL, C. (2007): Nährstoffökologische Untersuchungen zur Restitution von Sand-Ökosystemen der nördlichen Oberrheinebene. – Diplomarbeit Technische Universität Darmstadt: 68 pp.
- STORM, C. & BERGMANN, S. (2004): Auswirkungen von Schaf-Erstbeweidung auf die Vegetation primär basenreicher Sand-Ökosysteme. – In: SCHWABE, A. & KRATOCHWIL, A. (Eds.): Beweidung und Restitution als Chancen für den Naturschutz? – NNA-Berichte 17: 161–178.
- STORM, C., HERGET, I., KAPPES, J. & VORMWALD, B. (1998): Nährstoffökologische Untersuchungen im Darmstadt-Dieburger Sandgebiet in (teilweise ruderalisierten) Sandpionierfluren. – *Bot. Naturschutz in Hessen* 10: 41–85.
- STORM, C. & SÜSS, K. (2008): Are low-productive plant communities responsive to nutrient addition? Evidence from dry pioneer grassland. – *J. Veg. Sci.* 19 (3): 343–354.
- SSYMANK, A., HAUKE, U., RÜCKRIEM, C. & SCHRÖDER, E. (1998): Das europäische Schutzgebietssystem NATURA 2000. BfN-Handbuch zur Umsetzung der Fauna-Flora-

-
- Habitat-Richtlinie (92/43/EWG) und der Vogelschutzrichtlinie (79/409/EWG). – Schriftenr. Landschaftspfl. Naturschutz 53: 1–558.
- STROH, M. (2006): Vegetationsökologische Untersuchungen zur Restitution von Sand-Ökosystemen. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 128 pp.
- STROH, M. (2011): Das “Seeheim-Jugenheim-Experiment”: eine Pilotstudie zur Restitution durch extensive Landbewirtschaftung. – In: SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (Bearb.) Ried und Sand: Biotopverbund und Restitution durch extensive Landbewirtschaftung. Naturschutz und biologische Vielfalt 110: 163–178. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.
- STROH, M. & DIETZE, E. (2011): Projektstruktur, -verlauf und Maßnahmen im E+E-Vorhaben „Ried und Sand“ aus Sicht des Projektträgers „Hauptvorhaben“ (Landkreis Darmstadt-Dieburg). – In: SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (Bearb.) Ried und Sand: Biotopverbund und Restitution durch extensive Landbewirtschaftung. Naturschutz und biologische Vielfalt 110: 41–59. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.
- STROH, M., STORM, C. & SCHWABE, A. (2007) Untersuchungen zur Restitution von Sandtrockenrasen: das Seeheim-Jugenheim-Experiment in Südhessen (1999-2005). – *Tuexenia* 27: 287–305.
- STROH, M., STORM, C., ZEHR, A. & SCHWABE, A. (2002): Restorative grazing as a tool for directed succession with diaspore inoculation: the model of sand ecosystems. – *Phytocoenologia* 32: 595–625.
- STROH, M. & SÜSS, K. (2011): Beweidungsstruktur und Herdenmanagement im E+E-Vorhaben “Ried und Sand”. – In: SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (Bearb.) Ried und Sand: Biotopverbund und Restitution durch extensive Landbewirtschaftung. Naturschutz und biologische Vielfalt 110: 61–67. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.
- SÜSS, K. (2005): Succession versus grazing: effects on the vegetation of inland sand ecosystems. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 158 pp.
- SÜSS, K., FRITSCH, M., BAUER, A. & EICHBERG, C. (2011b): Zusammenhänge zwischen Tierernährung und Naturschutzwert in Ried-Sand-Beweidungssystemen. – In: SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (Bearb.) Ried und Sand: Biotopverbund und Restitution durch extensive Landbewirtschaftung. – Naturschutz und biologische Vielfalt 110: 261–296. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.
- SÜSS, K. & SCHWABE, A. (2007): Sheep versus donkey grazing or mixed treatment: results from a 4-year field experiment in *Armerio-Festucetum trachyphyllae* sand vegetation. – *Phytocoenologia* 37: 135–160.
- SÜSS, K. & SCHWABE, A. (2011): Erfolge bei der Restitution von Sandlebensräumen im E+E-Vorhaben "Ried und Sand": Vegetation und ausgewählte Indikator-Tierarten. – In: SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (Bearb.) Ried und Sand: Biotopverbund und Restitution durch extensive Landbewirtschaftung. – Naturschutz und biologische Vielfalt 110: 179–214. Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.
- SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (2009): Is the different diet selection by sheep and donkeys a tool for the management of threatened sand vegetation? – *Tuexenia* 29: 181–197.
- SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (2010): Sukzessionslinien in basenreicher offener Sandvegetation des Binnenlandes: Ergebnisse aus Untersuchungen von Dauerbeobachtungsflächen. – *Tuexenia* 30: 289–318.

- SÜSS, K., STORM, C. & SCHWABE, A. (Bearb.) (2011a): Ried und Sand: Biotopverbund durch extensive Landbewirtschaftung. – Naturschutz und Biologische Vielfalt 110: 1–350. Bonn–Bad Godesberg.
- SÜSS, K., STORM, C., ZEHM, A. & SCHWABE, A. (2004): Successional traits in inland sand ecosystems: which factors determine the occurrence of the tall grass species *Calamagrostis epigejos* (L.) Roth and *Stipa capillata* L.? – Plant Biology 6: 465–476.
- SÜSS, K., STORM, C., ZIMMERMANN, K. & SCHWABE, A. (2007): The interrelationship between productivity, plant species richness and livestock diet: a question of scale? – Appl. Veg. Sci. 10: 169–182.
- TER HEERDT, G.N.J., VERWEIJ, G.L., BEKKER, R.M. & BAKKER, J.P. (1996): An improved method for seed bank analysis, seedling emergence after removing the soil by sieving. – Funct. Ecol. 10: 144–151.
- WESSELS, S. (2007): The contribution of sheep zoochory to the conservation and restoration of target plant communities in isolated sand ecosystems. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 157 pp.
- WESSELS, S., EICHBERG, C., STORM, C. & SCHWABE, A. (2008): Do plant-community-based grazing regimes lead to epizoochorous dispersal of high proportions of target species? – Flora 203 (4): 304–326.
- WESSELS, S. & SCHWABE, A. (2008): Testing the potential seed availability in dung samples: comparison of two seedling emergence methods. – Flora 203 (5): 429–436.
- WESSELS-DEWIT, S. & SCHWABE, A. (2010): The fate of sheep-dispersed seeds: Plant species emergence and spatial patterns. – Flora 205: 656–665.
- ZEHM, A. (1997): Zur Koinzidenz von Sandvegetation, ihrer Struktur und Heuschrecken Zönosen (Orthoptera) in der hessischen Oberrheinebene. – Tuexenia 17: 193–222.
- ZEHM, A. (2003): Analyse der vertikalen Vegetationsstruktur: Methodenentwicklung und Beziehungen zu Pflanzengesellschaften, Mikroklima, Beweidung und Heuschrecken-Gemeinschaften. – Dissertation, Technische Universität Darmstadt: 312 pp.
- ZEHM, A. (2004a): Auswirkungen der Beweidung auf die vertikale Vegetationsstruktur von Sandrasen. – In: SCHWABE, A. & KRATOCHWIL, A. (Eds.) (2004): Beweidung und Restitution als Chancen für den Naturschutz? – NNA-Ber. 17: 69–77.
- ZEHM, A. (2004b): Praxisbezogene Erfahrungen zum Management von Sand-Ökosystemen durch Beweidung und ergänzende Maßnahmen. – In: SCHWABE, A. & KRATOCHWIL, A. (Eds.) (2004): Beweidung und Restitution als Chancen für den Naturschutz? – NNA-Ber. 17: 221–232.
- ZEHM, A. (2008): Praxis der Erstpflge von gehölzreichen, basenreichen Sandrasen. – Nat. Landsch. 83: 541–547.
- ZEHM, A., NOBIS, M. & SCHWABE, A. (2003) Multiparameter analysis of vertical vegetation structure based on digital image processing. – Flora 198: 142–160.
- ZEHM, A. & ZIMMERMANN, K. (2004): Sandgebiete in der hessischen Oberrheinebene: Untersuchungsflächen und Untersuchungsansatz des BMBF-Projektes „Sand-Ökosysteme im Binnenland“. – In: SCHWABE, A. & KRATOCHWIL, A. (Eds.) (2004): Beweidung und Restitution als Chancen für den Naturschutz? – NNA-Ber. 17: 15–26.
- ZEUCH, M. (1997): Pflanzensoziologische Untersuchungen der Kalksand-Kiefernwälder und -forsten bei Seeheim an der Bergstraße unter besonderer Berücksichtigung jüngster Veränderungen. – Diplomarbeit Technische Hochschule Darmstadt: 97 pp.

Nomenklatur

Die Nomenklatur der Gefäßpflanzen, Flechten und Moose richtet sich nach den folgenden Werken:

KOPERSKI, M., SAUER, M., BRAUN, W. & GRADSTEIN, S.R. (2000): Referenzliste der Moose für Deutschland. – Bonn-Bad Godesberg (Bundesamt für Naturschutz) – Schr.reihe Veg.kd. 34: 1–519.

SCHOLZ, P. (2000): Katalog der Flechten und flechtenbewohnenden Pilze Deutschlands. – Schr.reihe Veg.kd. 31: 1–298.

WISSKIRCHEN, R. & HAEUPLER, H. (1998): Standardliste der Farn- und Blütenpflanzen Deutschlands. – Ulmer, Stuttgart: 765 pp.

Autoren:

Prof. Dr. Angelika Schwabe-Kratochwil*
Technische Universität Darmstadt
Vegetations- und Restitutionsökologie
Schnittspahnstr. 4
D-64287 Darmstadt

Dr. Carsten Eichberg
Universität Trier
Raum- und Umweltwissenschaften, Geobotanik
Behringstr. 21
D-54296 Trier

Dr. Michael Stroh
Landkreis Darmstadt-Dieburg
Jägertorstr. 207
D-64289 Darmstadt

Dr. Christian Storm
Technische Universität Darmstadt
Vegetations- und Restitutionsökologie,
Schnittspahnstr. 4
D-64287 Darmstadt

* Korrespondierender Autor, E-mail: schwabe@bio.tu-darmstadt.de